

Agriculture et numérique

Tirer le meilleur du numérique pour
contribuer à la transition vers des agricultures
et des systèmes alimentaires durables



Agriculture et numérique

Avant-propos

Ce livre blanc est une initiative des directions générales d'INRAE et d'Inria qui nous ont rassemblés, missionnés et nous ont donné carte blanche pour coordonner et assurer la réalisation de cet ouvrage portant sur le numérique en agriculture du point de vue de la recherche. Nos réflexions se sont inscrites dans le contexte des principales dynamiques observées et prévisibles de l'agriculture dans les pays du monde entier qui visent à soutenir le développement de systèmes agricoles et alimentaires plus durables. En construisant l'analyse et les propositions que nous développons dans cet ouvrage, à partir d'un inventaire des enjeux, des opportunités et des risques associés au numérique en agriculture, nous n'avons pas cherché à retenir simplement ce qui faisait consensus, nous avons également laissé s'exprimer les diversités présentes au sein du groupe, en particulier en termes de priorisation des enjeux ou d'importance des risques pour l'agriculture et les systèmes alimentaires de demain. Ce livre blanc est ainsi un ouvrage collectif qui a été pensé dans le traitement de la question du numérique en agriculture comme un ensemble équilibré, avec un enchaînement et une articulation des chapitres qui permettent de balayer tous les aspects du sujet. Les différentes parties sont donc à mettre en perspective les unes par rapport aux autres, et les utiliser de manière isolée sans évoquer le tout pourrait tendre à présenter une vision biaisée.

Veronique Bellon-Maurel, INRAE, Ludovic Brossard, INRAE, Frédéric Garcia, INRAE, Nathalie Mitton Inria, Alexandre Termier, Université de Rennes 1 / Inria.

Maquette : Françoise Perret
Direction artistique : Sophie Barbier

Publication janvier 2022



Sommaire

Résumé	5
Les enjeux de l'agriculture exigent de revisiter les modes de production et d'approvisionnement alimentaires	6
Quels fondements et quel état des lieux des technologies et méthodologies ?	8
Le numérique offre des opportunités pour l'agroécologie et une alimentation durable	10
Des risques identifiés qu'il s'agira d'éviter	12
Les défis pour le développement d'un numérique au service des agricultures de demain	14
Conclusion générale	17
1. Introduction	18
2. Quels défis pour l'agriculture ?	22
2.1 La sécurité alimentaire mondiale sous tension	23
2.2 De l'urgence de réduire les impacts environnementaux négatifs de l'agriculture	25
2.3 Des dynamiques agricoles qui ont favorisé intensification et spécialisation	26
2.4 Quels modèles agricoles pour demain ?	27
2.5 L'inscription territoriale de l'agriculture	29
Conclusion	29
3. Fondements et état de l'art	32
3.1 La donnée	33
Captation de la donnée (quoi, pourquoi, où, comment)	33
Collecte et transmission de la donnée (Quelle donnée envoyer, quand, comment ?)	35
Stockage et échange de la donnée, traçabilité	38
3.2 Modélisation, simulation et optimisation	40
Modéliser quoi, pour quels objectifs, avec quels outils	41
Cadres de représentation	44
Modélisation et simulation	48
Modélisation et optimisation	50



3.3	Apprentissage et extraction de connaissances multiéchelle	51
	Les données massives en agriculture	52
	Prétraitements des données	53
	Approches supervisées	56
	Approches non supervisées	57
	Apprentissage par renforcement.	59
	Les entrepôts de données et analyse OLAP	61
3.4	Gestion et ingénierie des connaissances pour l'aide à la décision en agriculture	63
	Les systèmes à base de connaissances en agriculture	64
	Restitution des connaissances, visualisation, interactions homme-machine en agriculture	73
	Outils d'aide à la décision (OAD)	75
3.5	Automatisation, contrôle et robotique	77
	Les milieux structurés, alliés des robots	79
	De l'adaptation à la reconfiguration	81
	Conclusion	82
4.	Numérique et agroécologie : des opportunités à explorer, des défis à relever	83
4.1	Mieux produire : créer des connaissances pour accompagner la transition vers l'agroécologie	85
	Représenter les systèmes complexes de l'agroécologie	86
	Collecter des données en masse sur les nouveaux agroécosystèmes	86
	Modélisation à base de données, une étape vers une nouvelle connaissance	87
4.2	Mieux produire : le numérique pour assister l'agriculteur dans la conduite de l'exploitation	88
	Adapter les principes de l'agriculture de précision à l'agroécologie : observer et décider	88
	La décision multiobjectif dans la conduite de l'exploitation agroécologique	90
	Coconstruire agroéquipements et agroécosystèmes novateurs	91
4.3	Mieux s'inscrire dans l'écosystème de l'agriculture : chaînes de valeur, territoires	92
	Les services à l'agriculture renouvelés par le numérique	92
	Renouveler les chaînes de valeur avec une meilleure connexion aux marchés	94
	Gérer les ressources à l'échelle du territoire	98



4.4 Accompagner la transition : partage de données, d'informations, de connaissances	99
Le numérique, un atout pour le partage des connaissances	99
Approche participative et innovation ouverte	100
L'agriculteur, producteur de données	101
4.5 Les spécificités des pays du Sud	103
Conclusion	105
5. Risques	106
5.1 Compromettre la transition écologique de l'agriculture	108
Verrouiller la transition agroécologique	108
Distendre le lien de l'Homme à la nature	109
Contribuer à l'empreinte environnementale croissante du numérique	110
5.2 Renforcement des inégalités et des rapports de forces	111
Des risques d'exclusion	111
Perte d'autonomie des agriculteurs	112
Contrôle par l'aval et par l'amont	112
Accès à l'information et à la formation, et quel rôle pour le conseil ?	113
5.3 Perte de souveraineté	114
Perte d'autonomie dans la maîtrise de l'alimentation	115
Confiscation des données agricoles	115
Perte de maîtrise de l'outil de production	116
Un enjeu de cybersécurité	116
5.4 Accentuation de vulnérabilités et rendements négatifs	117
Vulnérabilités du système agroalimentaire	117
Complexification, rendements décroissants et risques associés	118
Conclusion	119
6. Les défis de demain	120
6.1 Fournir des outils numériques pour la gestion collective à l'échelle du territoire	121
Surveillance et mesure à l'échelle territoriale	121
Visualisation	123
Dispositifs numériques de médiation et gouvernance	124
6.2 Aider les agriculteurs dans la conduite individuelle de l'itinéraire technique	126
Les systèmes d'acquisition et de diagnostic	126



Les défis de la robotisation et les transformations du travail agricole du fait du numérique	128
Modéliser pour intégrer les effets systémiques et construire des OAD utiles et utilisables	130
6.3 Transformer les relations entre acteurs dans les filières	133
Le service : conseil et assurance	133
Traçabilité, transparence de toute la chaîne, vie des données	134
Plate-formisation et reconfiguration des circuits	136
6.4 Créer et partager des données et des connaissances	138
Conclusion	141
Conclusion	144
Contributions et remerciements	154
Bibliographies	156
Liste des acronymes	194





Résumé

Dans le monde entier, les systèmes alimentaires sont l'objet de profondes mutations sous le coup de pressions extérieures (changement climatique, organisation des chaînes de valeur...) et de facteurs intrinsèques (innovations, réduction du nombre d'agriculteurs...). La sécurité alimentaire, préoccupation numéro 1 au niveau mondial, s'accompagne aujourd'hui d'exigences fortes sur les modes de production pour les rendre plus durables ainsi que sur le maintien d'un tissu rural vivant, autour d'une agriculture familiale attractive. C'est pourquoi, comme le rappelle la FAO¹, l'agroécologie est un enjeu crucial en France et dans un nombre croissant de pays. Concomitamment à ces évolutions, l'agriculture connaît, comme tous les secteurs économiques, l'introduction rapide des technologies numériques. Depuis le milieu des années 2010 émerge donc le concept d'« agriculture numérique ». Il définit une agriculture et, au-delà, un système alimentaire, qui utilisent les sciences et technologies du numérique telles que les sciences des données et technologies d'acquisition (satellites, capteurs, objets connectés, *smartphones*...), de transfert et de stockage (couverture 3G/4G/5G, réseaux bas débits terrestres ou satellitaires, *clouds*) et les technologies de traitement embarquées ou déportées (supercalculateurs accessibles par des réseaux de communication très haut débit,

1. FAO (2018b), Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie, disponible sur <http://www.fao.org/3/I9049FR/i9049fr.pdf>

intelligence artificielle), ceci à toutes les échelles de la production agricole et de son écosystème : exploitation, services d'accompagnement, territoire, chaîne de valeur².

Le numérique est souvent perçu par les gouvernements et les experts comme une opportunité à saisir pour contribuer à l'évolution de l'agriculture, au bénéfice des agriculteurs, des consommateurs et plus généralement de la société. Qu'en est-il ? Quel numérique développer pour cela ?

Ce livre blanc tente d'éclairer ces questions et de donner des pistes pour orienter les recherches afin de mieux comprendre, maîtriser, préparer, équiper et accompagner le déploiement du numérique en agriculture et dans la chaîne alimentaire, en prenant en compte la manière dont il va transformer les filières et leur écosystème, avec comme objectif de le mettre au service de la transition agroécologique (TAE), de la territorialisation de l'alimentation et de chaînes d'approvisionnement rééquilibrées. Il est organisé en six chapitres. Après l'introduction, le chapitre 2 détaille les enjeux de la transformation de l'agriculture et des systèmes alimentaires. Un état de l'art permet ensuite de faire le point sur les technologies numériques existantes (chapitre 3). Les possibilités offertes par le numérique pour la transition agroécologique et une meilleure inclusion dans la société sont ensuite inventoriées (chapitre 4). L'identification des risques liés à un développement non maîtrisé de l'agriculture numérique est tout aussi nécessaire pour les éviter ou en minimiser les écueils (chapitre 5). Le chapitre 6 énonce les questions et défis techniques identifiés qui pourraient en particulier mobiliser nos deux instituts, INRAE et Inria mais aussi l'écoystème français de la recherche, pour développer un numérique responsable pour l'agriculture.

Les enjeux de l'agriculture exigent de revisiter les modes de production et d'approvisionnement alimentaires

Aujourd'hui, un ensemble de changements globaux met le système agro-alimentaire en tension. D'une part, il s'agit de nourrir une population toujours plus nombreuse (9,5 milliards d'habitants en 2050 selon le scénario médian de l'ONU) et dont le régime alimentaire – comme en Chine – évolue, tout en s'adaptant à un contexte de plus en plus dégradé : changement climatique, effondrement de la biodiversité, réduction des ressources (sols, eau douce, phosphore). D'autre part, l'agriculture doit accélérer sa mutation pour mettre en place des systèmes

2. Bellon-Maurel V., Huyghe C. (2016) *L'innovation technologique en agriculture*. Géoéconomie, 80 - mai/juin 2016, pp. 159-180

d'élevage plus respectueux du bien-être animal et pour réduire son impact sur l'environnement (réduction de l'usage des intrants comme les antimicrobiens, les fertilisants, les pesticides, usage raisonné des ressources naturelles comme l'eau, réduction du tassement des sols et de l'émission de gaz à effets de serre, meilleur usage des régulations biologiques), voire pour contribuer au stockage³ du CO₂ et au maintien de la biodiversité. Depuis soixante-dix ans, les dynamiques agricoles ont favorisé l'intensification et la spécialisation. Les filières agricoles sont basées sur la compétitivité des prix, un phénomène exacerbé par la mondialisation. Fondièrement, elles sont l'objet de rapports de forces déséquilibrés entre des acteurs ayant des intérêts divers voire divergents. Par ailleurs, l'activité agricole s'insère dans des territoires dont beaucoup se sont spécialisés, entraînant des déséquilibres. La grande complexité qui en résulte (en termes de spécialisation et d'interdépendance de ces éléments) amplifie les instabilités, multiplie les risques de défaillances et constitue enfin un frein considérable aux changements. Ainsi, il est crucial de mettre en œuvre très rapidement des stratégies pour améliorer les techniques de production et les modes d'organisation du système agroalimentaire dans le but d'augmenter leur résilience.

Selon la FAO, la production peut évoluer vers deux modèles⁴ : l'intensification durable (amélioration de l'efficacité des processus et insertion dans des filières longues) et l'agroécologie⁵, qui s'appuie sur les processus naturels pour produire et qui s'inscrit dans des systèmes alimentaires de proximité et souverains. Ce second modèle est maintenant soutenu par la loi Égalim⁶, de nombreuses collectivités territoriales et des citoyens. La structure des exploitations est aussi un point d'attention : il s'agit de procurer les conditions d'un travail décent aux agriculteurs et de préserver l'agriculture familiale, majoritaire dans le monde.

Dans ce contexte, le numérique pourrait contribuer à la transition vertueuse vers l'agroécologie des systèmes alimentaires territorialisés et contribuer au maintien d'une agriculture familiale : apport d'informations pour mieux comprendre ces systèmes complexes, aide à la décision individuelle ou collective, appui à l'action concrète, à l'échange, à la reconfiguration des chaînes de valeur, appui à l'élaboration de stratégies et politiques... C'est précisément cette voie d'un

3. <https://www.4p1000.org/fr/linitiative-4-pour-1000-en-quelques-mots>

4. HLPE (2016). *Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock?* A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i5795e.pdf>

5. L'agroécologie est un ensemble de pratiques qui vise à améliorer les systèmes agricoles en « imitant » les processus naturels, créant ainsi des interactions et synergies biologiques bénéfiques entre les composantes de l'agroécosystème.

6. LOI n° 2018-938 du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous (1), <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037547946/>

numérique au service de la transition vers l'agroécologie et le renouvellement des systèmes alimentaires que nous avons choisi d'explorer dans ce livre blanc.

Quels fondements et quel état des lieux des technologies et méthodologies ?

Avant de réfléchir à un numérique destiné à servir cette ambition de transformation, la première étape est de connaître ce que peuvent offrir les avancées des recherches actuelles. L'agriculture numérique s'appuie sur trois leviers, qui, mobilisés conjointement, mènent aux innovations : (1) l'abondance des données, due au développement des capteurs (du nanocapteur au satellite) et aux facilités accrues de communication et de stockage, (2) les capacités de calcul, rendant possible la mise en œuvre de l'intelligence artificielle et de nouveaux modes de modélisation, (3) la connectivité et les interfaces d'échange d'information. À ces trois leviers s'en ajoute un quatrième, déjà existant mais renouvelé par les capacités de mesure et de calcul, celui de l'automatisation et de la robotisation. Nous aborderons en particulier les technologies et méthodologies suivantes.

LES DONNÉES⁷

Les capteurs, à l'origine des données acquises sur le terrain, posent des défis matériels et logiciels : il faut définir la nature de la grandeur à mesurer, la – ou les – technologie(s) de mesure à préférer et la manière de la (les) mettre en œuvre pour obtenir une information utile à moindre coût. Les images satellites gratuites (Sentinel 2), les objets connectés et les applications collaboratives sur téléphones portables sont des sources de données massives. Par traitement, on pourra alors soit accéder directement à la quantification de la propriété recherchée, soit indirectement en fusionnant des données multisources. Cette dernière approche est une stratégie pour améliorer l'exactitude de la valeur évaluée mais pose de nombreuses questions d'agrégation du fait de l'hétérogénéité de la nature des sources et de leurs granularités et précisions. L'accès à la donnée est aussi un enjeu : la FAIRisation des données facilite leur réutilisation, les *blockchains* permettent de partager de manière infalsifiable des données entre acteurs ayant des intérêts divergents (comme dans les chaînes de valeur).

7. Il faut rappeler que l'agriculture numérique est issue des communautés de l'agriculture et de l'élevage de précision ; ce qui explique que, dans le consensus actuel, l'agriculture numérique utilise des données collectées sur le terrain, initialement dans le cadre de l'agriculture de précision, mais pas les données génomiques. Une convergence entre les deux communautés se développera certainement dans les années qui viennent, en particulier via le phénotypage.

LA MODÉLISATION

C'est l'élément-clé de la représentation des agroécosystèmes, par nature complexes, pour les simuler, les optimiser, les piloter. Les échelles vont de la plante ou l'animal à la population, au territoire ou à la chaîne de valeur avec, de plus, un enjeu associé au couplage des échelles et des modèles représentant les sous-systèmes. La modélisation, approche ancienne en agronomie, est aujourd'hui renouvelée grâce au numérique. D'une part, la profusion de données amène à compléter les approches mécanistes classiques qui reposent sur une analyse humaine par des modèles empiriques issus du traitement des données (méthodes multivariées linéaires ou non, intelligence artificielle). D'autre part, les systèmes modélisés deviennent plus complexes et incluent les humains. Ainsi, la modélisation décisionnelle mobilise des notions supplémentaires (rationalité limitée), et des cadres spécifiques pour tenir compte de l'agent humain : systèmes à événements discrets, systèmes à base d'agents, modèles à base de contraintes, etc. La simulation est mobilisée pour représenter des agrosystèmes, voire des socioécosystèmes, aux comportements difficiles à analyser ; elle procure une description des états possibles et ses usages sont multiples, comme l'aide à la décision individuelle ou collective (modèles d'accompagnement), la formation... L'optimisation va plus loin dans l'aide à la décision (la prescription), puisqu'elle recherche des solutions à un problème donné suivant un ou plusieurs critères. Elle est utilisée en automatique (pilotage de serres ou de dispositifs agrivoltaïques), en robotique, pour la décision individuelle (formulation d'aliments, planification des cultures...) mais aussi pour la décision collective (gestion des terres ou de l'eau, décisions économiques...). Elle s'appuie sur un panel de méthodes pour intégrer de plus en plus la complexité (méthodes déterministes, méthodes stochastiques de métaheuristique...). Elle pose de nombreuses questions de recherche, liées à l'incertitude, la temporalité, la complexité des processus à modéliser...

L'EXTRACTION DE CONNAISSANCES

En plus de ces démarches analytiques de modélisation, de nouvelles familles apparaissent avec des modèles directement inférés des données, quand celles-ci sont suffisamment nombreuses pour couvrir l'espace des possibles. C'est en particulier le cas des données de télédétection ou des séries temporelles (par exemple collectées *via* des objets connectés). Après un nécessaire prétraitement pour améliorer la fiabilité de ces données (« nettoyage », rapprochement avec des données expertes), celles-ci sont traitées *via* différents formalismes pour extraire des informations intelligibles. Les approches supervisées consistent à prédire des valeurs (impossibles à mesurer directement) ou à classer dans différentes catégories, par des méthodes linéaires ou non linéaires (ex : réseaux de neurones), ce qui suppose de disposer de séries de données mesurées et de données de référence (la grandeur recherchée). Si la donnée de référence

n'est pas disponible, on a recours à des approches non supervisées (*clustering*, découverte de motifs). Des méthodes spécifiques sont mises en œuvre pour augmenter les performances des systèmes d'apprentissage (apprentissage par renforcement) ou d'agrégation des données (traitements OLAP). Les nouvelles connaissances qui sont extraites ou générées par les modèles sont formalisées et organisées afin d'être restituées à des publics variés, *via* des outils d'aide à la décision adaptés à chaque activité, qu'elle relève de la culture ou de l'élevage, et à toutes les échelles. De nouvelles ontologies sont nécessaires pour créer les interfaces ergonomiques qui permettront de partager, de lier et d'exploiter ces connaissances, en particulier en visant les opportunités ouvertes par le Web sémantique.

LA ROBOTIQUE

Autre facette du numérique, les systèmes automatisés et/ou robotisés sont de plus en plus précis et fiables. Si la robotique s'est initialement développée dans l'élevage (robots de traite à postes fixes, robots de nettoyage en milieux fermés), elle fait face à des enjeux supplémentaires en productions végétales (milieu extérieur non maîtrisé, changeant...). L'usage du GPS, la question de la localisation précise, sécurisée et à bas coût et la préservation de l'intégrité du robot mobile (éviter les collisions, être capable de franchir des obstacles) sont toujours des enjeux, tout comme les modes de coopération entre humains et robots, entre animaux et robots, entre différents robots, ou encore entre robots terrestres et drones aériens.

Le numérique offre des opportunités pour l'agroécologie et une alimentation durable

Bien orienté, le numérique pourrait ouvrir de nombreuses opportunités en réponse aux enjeux de la transition agroécologique, une meilleure inscription dans les écosystèmes vertical (amont-aval) et horizontal (territorial) de l'agriculture, et l'accroissement des capacités d'action des agriculteurs.

MIEUX PRODUIRE

Des dispositifs qui assisteraient l'agriculteur sur les plans sensoriel (capteurs), cognitif (OAD pour Outil d'aide à la décision) et physique (machines) pourraient permettre d'améliorer les modes de production. Le concept de l'agriculture ou de l'élevage de précision est aujourd'hui plutôt associé à une agriculture intensive ; il n'en reste pas moins valable en agroécologie, en particulier pour surveiller la bonne santé des plantes et des animaux, sur la base d'observations automatisées *via* des

capteurs et des modèles, mais aussi pour mettre en œuvre – à grande échelle – des procédés cultureux plus complexes (associations de cultures, collectes sélectives...). Cela nécessite de disposer de capteurs et de modèles capables d'analyser le signal reçu pour donner au choix une description de l'état, une prévision de l'état futur ou une prescription. Au-delà de la décision tactique qui déclenche l'intervention, certains modèles pourraient aider à prendre des décisions stratégiques quant à l'organisation de la production, phase particulièrement délicate dans les processus de transition (TAE, changement climatique) et les décisions multiobjectifs. Assistants physiques réduisant la pénibilité, les robots pourraient débloquer les contraintes très particulières des nouveaux systèmes de culture (cultures associées, agroforesterie) ou systèmes d'élevage (robots de traite pour le pâturage). Mais mieux produire implique aussi de construire au préalable les connaissances sur ces nouveaux systèmes, diversifiés et complexes. La construction de la connaissance indispensable à la TAE pourrait bénéficier de trois leviers numériques interconnectés : (i) la représentation de ces systèmes complexes ; (ii) la collecte massive – éventuellement participative – de données sur ces nouveaux modes de culture et d'élevage (phénotypage à la ferme) ; (iii) l'inférence de nouveaux modèles à partir des données.

MIEUX S'INSCRIRE DANS L'ÉCOSYSTÈME

Le numérique pourrait permettre de renouveler l'écosystème de l'agriculture incluant les services à l'agriculture (assurance, conseil), l'organisation des chaînes de valeur, la gestion des territoires agricoles. Les chaînes de valeur sont transformées par la désintermédiation, favorisée par Internet, mais aussi par la possibilité d'une « transparence » sur l'histoire du produit, qui est aujourd'hui de plus en plus réclamée par les consommateurs. La *blockchain*, une technologie souvent citée comme garante de cette transparence, soulève encore de nombreuses questions techniques et de gouvernance. Autre facette de l'écosystème agricole, la gestion des territoires est impactée par le numérique. L'échelle des territoires est pertinente en agroécologie (écologie paysagère, bouclage des cycles via l'économie circulaire) et l'agriculture, qui a une place centrale dans les territoires, est l'objet de tensions liées à l'utilisation de ressources (les terres, l'eau) ou à son rôle dans les services écologiques. Le numérique pourrait fournir des outils pour mieux identifier les flux de matières et pour faciliter la médiation et la prise de décision collective (modèles d'accompagnement...).

MIEUX PARTAGER ET APPRENDRE

Du fait de la connectivité, les sciences et technologies du numérique facilitent le partage et l'apprentissage individuel et collectif, sources d'innovation en agroécologie. Le savoir (y compris traditionnel) est capitalisé et échangé entre pairs, soit en direct (réseaux sociaux), soit dans des processus collectifs participatifs qui

intègrent de plus en plus le numérique (*Digital Farmers Field School*⁸). L'approche participative à visée innovante (innovation ouverte, *living labs*) pourrait être enrichie par les technologies qui facilitent la capitalisation, la représentation, l'expression et le traitement des données et qui peuvent tracer la contribution de chacun. Enfin, l'agriculteur pourrait devenir un fournisseur de données à des acteurs privés ou publics (recherche *via* l'expérimentation à la ferme, la documentation territoriale...), ce qui pourrait faire évoluer son statut dans le sens d'une meilleure intégration et d'une meilleure reconnaissance.

LES OPPORTUNITÉS DANS LES PAYS DU SUD

La plupart des organisations et bailleurs internationaux voient le numérique comme une source de transformation majeure dans les pays du Sud et en particulier en Afrique. Le numérique pourrait permettre de diversifier l'économie des services, d'accélérer les transformations structurelles de l'agriculture et de renforcer son attractivité envers les jeunes, d'améliorer les chaînes de valeur de proximité (construire des systèmes alimentaires territorialisés) ou en circuit long (garantir une traçabilité des produits), de contribuer à construire le capital informationnel des territoires. Cependant, des questions techniques persistent liées à la faiblesse de la couverture réseau, au manque d'infrastructures, à la faiblesse des systèmes d'information, et à la prise en compte de la diversité des langues voire de l'illettrisme dans les interfaces hommes-machines. Au-delà, le numérique pose aussi des questions politiques, économiques et sociales.

Des risques identifiés qu'il s'agira d'éviter

Le développement du numérique dans la société, avec les changements qu'il engendre, s'accompagne naturellement de risques inhérents. Le secteur de l'agriculture n'est pas en reste, et de nombreuses interrogations voient le jour quant à la tenue des promesses portées par l'agriculture numérique, aux difficultés qu'elle pourrait rencontrer et aux vulnérabilités qu'elle pourrait accentuer.

Le premier risque identifié est celui de décevoir l'attente d'une agriculture plus écologique. Certes, le développement du numérique en agriculture apporte des solutions de réduction des intrants ; mais ce gain pourrait s'accompagner d'un verrouillage technologique qui pourrait faire obstacle à la mise en place de pratiques et d'organisations alternatives plus radicales et plus systémiques qui pourraient amener à des gains environnementaux et socioéconomiques plus

8. Witteveen, L., Lie, R., Goris, M., Jane Ingram, V. (2017) *Design and development of a Digital Farmer Field School. Experiences with a digital learning environment for cocoa production and certification in Sierra Leone*. *Telematics and Informatics* 34(8), DOI: 10.1016/j.tele.2017.07.013

importants. Par ailleurs, la mise en place généralisée d'interfaces numériques entre l'agriculteur et les animaux ou les plantes, dans une démarche de technologisation croissante de la production agricole, risque également d'amener une forme de perte de lien à la nature (et en particulier dans le lien homme-animal), alors que la société attend sans doute une agriculture en lien plus fort au monde vivant qui nous entoure. Enfin, le numérique a une empreinte écologique certaine, encore mal connue en agriculture, et la multiplication des équipements et opérations de captation de données, de transfert, de stockage et de calcul pourrait dégrader le bilan environnemental de l'agriculture numérique.

Une seconde famille de risques à considérer est celle relative aux conséquences sociales du renforcement, par le numérique, d'une trajectoire d'industrialisation, avec une concentration de la production dans des unités et exploitations toujours plus grandes, orientées vers la productivité. Ce mouvement entraînerait des risques d'exclusion des formes minoritaires d'agriculture, principalement pour les exploitations agricoles de petite dimension économique. Le développement de la robotique pourrait renforcer une précarisation du travail agricole, notamment des populations pauvres de travailleurs immigrés. Les difficultés d'accès aux technologies numériques seraient aussi un facteur d'exclusion en agriculture, que ce soit au niveau individuel (manque de compétences) ou territorial (retard d'infrastructures numériques). La digitalisation pourrait avoir des conséquences sur l'autonomie de décision des agriculteurs (usage des OAD) voire le sens qu'ils donnent à leur métier, avec leur crainte de devenir de simples « travailleurs de données ». Une autre interrogation sur la digitalisation porte sur l'évolution des rapports de force entre l'agriculture et ses secteurs d'amont et d'aval. Avec l'amont, les technologies numériques pourraient impacter la maîtrise des outils de production du fait de la complexification des outils, qui rend la maintenance et la formation de plus en plus difficiles et qui pourrait accroître la dépendance à certains intrants ciblés⁹. Avec l'aval, les nouvelles technologies de la donnée pourraient changer la place de certains acteurs – dont les firmes du secteur du numérique – dans les chaînes de valeur, avec des conséquences en termes de partage, de gouvernance, et le risque de formes de filialisation de l'agriculture pilotées par l'aval. Enfin, il est nécessaire de considérer l'inquiétude que font peser les technologies numériques sur le conseil agricole, et ses acteurs, ses méthodes, son contenu, sa légitimité même.

Une troisième famille de risques identifiée concerne la souveraineté numérique et alimentaire. La numérisation croissante de la chaîne alimentaire peut conduire à une intégration de l'agriculture, avec l'apparition d'acteurs et

9. Un parallèle éclairant est celui du verrouillage «imprimante/encre» : les imprimantes sont vendues à des prix très bas, mais exigent d'utiliser les encres de la même marque, vendues elles à des prix très élevés.

d'outils monopolistiques. La souveraineté numérique passe également par la maîtrise de la donnée, et il existe un risque de confiscation des données agricoles par les fournisseurs de technologies ou services numériques (agro-équipements, sociétés AgTech, géants du numérique...). Le partage des données agricoles, qui est une priorité pour l'innovation, doit donc être organisé, et la gouvernance de ces données, clarifiée. Enfin, les risques liés à la cybersécurité sont à prendre en compte : possibilité d'attaques *via* les objets connectés (capteurs, robots, etc.), disponibilité des systèmes de géolocalisation, enjeu autour de la protection contre le piratage (vol, altération, destruction) de données agricoles. Relativement épargnés aujourd'hui, nos systèmes alimentaires sont d'une importance vitale, ce qui pourrait à l'avenir les transformer en cibles potentielles.

Enfin, la digitalisation du système agroalimentaire risque d'accroître des dépendances envers des ressources, entre les différents acteurs de ce système et d'en créer de nouvelles avec les acteurs qui produiront et détiendront ces technologies. Ceci risque d'accentuer les vulnérabilités de ce système face aux nombreux chocs qui affecteront inévitablement et lourdement tout le fonctionnement de nos sociétés dans les prochaines décennies. De façon plus globale, il faut constater que l'agriculture et ses secteurs d'amont et d'aval forment un système sociotechnique complexe dont le coût énergétique global augmente ; il s'agit de le maintenir en deçà des bénéfices escomptés par la digitalisation. Le développement du numérique pouvant amplifier la dynamique de complexification, il faut éviter qu'il n'occasionne une fuite en avant technologique, qui nous enfermerait dans une spirale de complexité incontrôlée.

Les défis pour le développement d'un numérique au service des agricultures de demain

Saisir les opportunités d'un numérique au service de l'agroécologie et de chaînes de valeur rééquilibrées, tout en identifiant et en anticipant les risques, soulève des défis scientifiques, techniques, économiques, organisationnels, et politiques. Nous détaillons particulièrement les défis scientifiques et techniques ainsi que les défis humains associés, pour répondre à quatre grands types d'enjeux des systèmes alimentaires durables : (i) mieux gérer collectivement, en intégrant l'échelle des territoires, (ii) mieux gérer l'exploitation agricole, (iii) rééquilibrer la chaîne de valeur, de l'amont à l'aval, (iv) créer et partager des données et des connaissances.

GESTION COLLECTIVE

Elle génère des besoins nouveaux : (i) collecter des données à l'échelle des territoires (en gérant le compromis entre spécificité, étendue de la mesure, résolution et hétérogénéité des données multisources), (ii) visualiser ces données et les résultats post-traitement, pour des publics non spécialistes (en restituant des notions complexes comme l'incertitude, l'incomplétude...), (iii) enrichir les méthodes de l'ingénierie territoriale pour faciliter la participation et l'innovation ouverte (besoin de modèles d'accompagnement, de ludification, d'outils d'analyse des séances participatives), la prise de décision collective (outillage numérique des processus de délibération, négociation, vote) et la médiation (création d'« objets-frontières » numériques, comme les modèles d'accompagnement, pour favoriser le dialogue des porteurs d'enjeux).

GESTION INDIVIDUELLE DE L'EXPLOITATION

Il s'agit d'accroître les capacités perceptives, cognitives et physiques de l'agriculteur. Pour la perception, les besoins concernent la géolocalisation très précise et sécurisée, les systèmes de détection précoce des problèmes chez les plantes ou les animaux, des capteurs frugaux, peu coûteux et non invasifs, le traitement distribué de la donnée pour limiter les transferts, la fusion de données hétérogènes pour construire des indicateurs pertinents, des stratégies de réduction de l'incertitude. Concernant la décision, les défis de recherche concernent plusieurs aspects de la construction des modèles : représenter les socioagroécosystèmes, complexes et étendus (modélisation multiéchelle, multitemporelle, intégration des interactions, notion de jumeau numérique), intégrer la connaissance experte dans les modèles (connaissance du milieu, choix stratégiques), construire des OAD centrés utilisateur (personnaliser les informations inférées, créer des modèles évolutifs, garantir le fonctionnement de la recommandation faite, adapter l'interface utilisateur aux spécificités du travail agricole), gérer l'incertitude et sa propagation. En robotique, des défis restent à relever sur la perception et l'interprétation de scène dans un milieu dynamique (c'est-à-dire l'analyse des images et autres « perceptions » du robot), la manipulation mobile et la coordination avec un porteur en mouvement, l'interaction homme-machine et l'autonomie partagée, la sûreté de fonctionnement et l'adaptation à de nouveaux systèmes de production, et au-delà de la technique, des questions de sciences humaines sur le lien entre robotique et transformation du travail.

ÉCOSYSTÈME DE L'AGRICULTURE ET RELATIONS ENTRE ACTEURS

À l'amont, les services pourraient être améliorés grâce au numérique : il s'agit de développer un conseil « numérique » plus personnalisé, ce qui demande d'intégrer les caractéristiques et le potentiel de l'exploitation mais aussi les préférences de l'agriculteur dans les modèles sous-jacents. Les polices d'assurances pourraient

être améliorées en créant de nouveaux indicateurs, plus justes, issus de données collectées automatiquement (télé-détection, objets connectés). À l'aval, la reconnexion entre agriculteurs et consommateurs pourrait être aidée par des solutions numériques simples accroissant la transparence (informations sur les produits) et améliorant la plate-formisation. La *blockchain* pourrait être une réponse à la demande de transparence avec encore de nombreux défis techniques (lien entre le flux d'information et le flux physique, couplage entre *blockchains* privées et publiques, coût environnemental des *blockchains* publiques, intégration des données en vue de réutilisation), mais aussi institutionnels (quelle gouvernance des *blockchains* ?). La plate-formisation et la désintermédiation posent d'autres défis : planification de la production, distribuée chez de multiples agriculteurs (pour répondre aux besoins de volumes de la restauration collective ou des villes), coordination des acteurs au sein de « *food hubs* » agrégateurs de produits, élaboration de solutions logistiques pour la production périurbaine. Dans les pays du Sud, ce sont là des enjeux cruciaux pour éviter les pertes post-récoltes, aggravées par les conditions climatiques particulières.

DES OUTILS POUR PARTAGER DONNÉES ET CONNAISSANCES

Données et connaissances seront au cœur d'un numérique construit pour favoriser l'agroécologie, sous réserve de relever les défis afférents à leur partage, qui sont scientifiques, technologiques, réglementaires, organisationnels et institutionnels. Les données participatives (par des praticiens ou des profanes) vont se multiplier, posant des questions de qualité des données, d'estimation et de calcul de la valeur produite, voire sur la reconnaissance du rôle des acteurs dans l'innovation produite. Quelles modalités de gouvernance pour ces données dans le cadre d'une réutilisation ? Comment favoriser une circulation vertueuse et sécurisée de la donnée, qui évite une prise de pouvoir par un des acteurs ? Quant à la connaissance, qu'il s'agit de coconstruire (participatif, jeux sérieux...) et de formaliser, elle pose la question des communs numériques, de recueil et de connexion d'expertise *via* des ontologies qui nécessiteront mise en commun et alignement.

EN CONCLUSION, DES DÉFIS TRANSVERSAUX SOUS-TENDRONT TOUTE RECHERCHE SUR LE NUMÉRIQUE AGRICOLE

Les recherches destinées à construire un numérique responsable pour une agriculture durable devront absolument intégrer (i) une vision systémique pour l'agriculture et le numérique (tenant compte des impacts de la technologie), (ii) la recherche de la frugalité (pour éviter les coûts environnementaux et économiques), (iii) la recherche de la résilience des systèmes alimentaires, plutôt que l'optimisation économique, et la préservation de l'autonomie de l'agriculteur et

(iv) la cybersécurité (attaques *via* l'IoT, détournement de données, brouillage de la géolocalisation...), sujet d'autant plus indispensable qu'il touche à la souveraineté alimentaire.

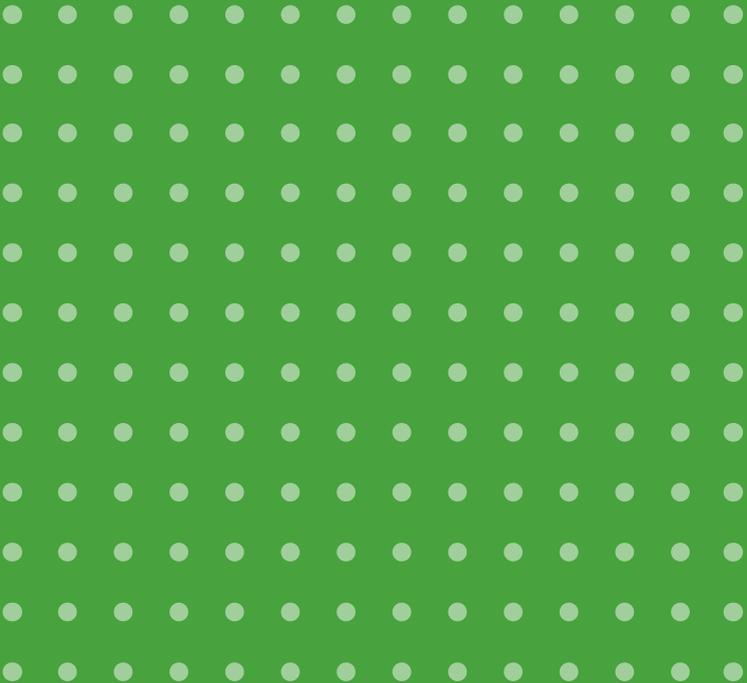
Conclusion

La transition des systèmes alimentaires et de l'agriculture vers des modes plus durables (agroécologie, systèmes alimentaires territorialisés, chaînes longues rééquilibrées...) dans un contexte de changement climatique est un des grands challenges des années à venir. Le numérique se déploie rapidement en agriculture, pouvant aussi bien apporter des solutions que contribuer à dégrader des équilibres fragiles. Le numérique pourrait accompagner et accélérer des transitions vertueuses mais il est impératif d'anticiper et d'éviter les écueils liés à des mésusages. Les défis de recherche particulièrement pertinents concernent l'acquisition de données à diverses échelles et les questions associées de gouvernance, les dispositifs qui assisteraient les agriculteurs sur les plans cognitif (aide à la décision), sensoriel (acquisition et transmission d'information) ou physique (outils, robots et cobots¹⁰), la modélisation de ces systèmes complexes et la gestion de l'incertitude associée, les outils numériques pour encourager les processus participatifs – essentiels dans la TAE –, la traçabilité et la valorisation des données auprès des consommateurs et enfin, la cybersécurité, essentielle, du fait que la production agricole concerne la souveraineté alimentaire. Pour construire un numérique responsable au service des agriculteurs, l'approche est fondamentale : la posture de recherche à privilégier pourra faire appel au cadre de la recherche et l'innovation responsable (RRI), qui commence à voir le jour en agriculture numérique et nécessite un degré certain d'inter- voire de transdisciplinarité. Enfin, il est important de rappeler qu'il y a plusieurs modèles d'agriculture et qu'il y aura demain encore plus de diversité, ce qui amènera à développer « des numériques » adaptés à chaque modèle et à ses besoins.

10. Éléments robotisés qui collaborent avec l'Homme.



Introduction



Les systèmes alimentaires, c'est-à-dire « *les manières dont les Hommes s'organisent, dans l'espace et dans le temps, pour obtenir et consommer leur nourriture* » (Malassis, 1994) sont l'objet de profondes mutations sous le coup de pressions extérieures (changement climatique, organisation des chaînes de valeur...) et de facteurs intrinsèques (innovations, réduction du nombre d'agriculteurs...), et ce, dans le monde entier. Les modes de consommation se transforment sous la pression de cinq types de facteurs : (i) les facteurs démographiques et de modes de vie, (ii) les facteurs économiques, (iii) les facteurs culturels et relatifs aux valeurs, (iv) les facteurs technologiques et (v) les facteurs réglementaires (Blezat consulting et al., 2017). Au niveau mondial, « *la principale préoccupation concernant l'avenir de l'alimentation et de l'agriculture est de savoir si ces systèmes seront en mesure de nourrir tout le monde de manière durable et efficace d'ici 2050 et au-delà, tout en répondant à la demande supplémentaire de produits agricoles due à des utilisations non alimentaires* » (FAO, 2018a). Mais si la sécurité alimentaire est la préoccupation numéro 1 au niveau mondial, l'agroécologie¹¹, et en particulier son déploiement à grande échelle, incluant les petites exploitations, est aussi un des enjeux pointés par la FAO (FAO, 2018b). Le maintien d'une agriculture familiale et d'un tissu rural vivant est lié à l'attractivité des métiers agricoles, autre enjeu que l'on retrouve au niveau mondial. En France, l'agriculture est engagée dans la transition agroécologique pour accroître sa résilience (s'adapter au changement climatique), réduire son impact environnemental (moins de pesticides, d'antibiotiques, de fertilisants...), respecter le bien-être animal, et procurer à l'agriculteur un revenu décent.

En parallèle de ces grandes évolutions des modes de production et de consommation alimentaires, un autre phénomène émerge dans les systèmes alimentaires : il s'agit du numérique, qui s'y déploie, comme dans tous les secteurs de l'économie, car ce sont « *des technologies polyvalentes qui transforment les processus et la vie dans tous les domaines de la planète* » (Scholz et al., 2018). On parle alors d'agriculture numérique.

Par « agriculture numérique », on entend une agriculture – et au-delà, un système alimentaire – « *qui utilise les technologies de l'information et de la communication (TIC) : technologies d'acquisition de données (satellites, capteurs, objets connectés, smartphones...), de transfert et de stockage (couverture 3G/4G, réseaux bas débit terrestres ou satellitaires, clouds) et technologies de traitement embarquées ou déportées (supercalculateurs accessibles par des*

11. Nous reprenons ici la définition de (Caquet et al. 2020) : « *L'agroécologie est à la fois un domaine scientifique, une pratique et un mouvement social. [...] L'agroécologie est avant tout un nouveau paradigme qui vise à valoriser les processus biologiques pour couvrir à la fois des attentes de production agricole et d'autres services écosystémiques des agrosystèmes : protéger les ressources, contribuer à atténuer le changement climatique, préserver les habitats et les patrimoines culturels.* »

réseaux de communication très haut débit) [...] et ceci à toutes les échelles de la production agricole et de son écosystème, que ce soit au niveau de l'exploitation (optimisation des opérations culturales, de la conduite de troupeau...), dans les services d'accompagnement (nouveaux services de conseil agricole basés sur des données collectées automatiquement), ou à des échelles plus grandes comme dans un territoire (gestion de l'eau) ou dans une chaîne de valeur (amélioration des intrants comme par exemple les semences¹², meilleure adéquation entre la production et le marché...). » (Bellon-Maurel et Huyghe, 2016). Il est important de préciser qu'il existe aujourd'hui un consensus au niveau mondial sur la définition de l'agriculture numérique, qui s'appuie globalement sur ces mêmes leviers : la multiplication des données collectées « sur le terrain », la place de l'intelligence artificielle, la connectivité, l'automatisation. Aujourd'hui, ce consensus exclut la génomique, dont les données sont collectées en laboratoire. C'est pourquoi, dans cet ouvrage, nous prenons délibérément le parti de ne pas l'aborder. Des connexions entre ces deux sujets seront données en conclusion (en particulier avec l'intérêt de collecte de données très fines pour caractériser l'environnement).

L'usage de technologies numériques en agriculture, initié il y a une cinquantaine d'années (satellites, puis capacités de calcul, GPS, etc.), est aujourd'hui démultiplié avec de nouveaux systèmes d'acquisition de données massives (satellites Sentinel, objets connectés et Internet des objets – *IoT* –, phénotypage haut débit, traçabilité dans les filières) et l'explosion des capacités de traitement. Le terme « agriculture numérique » a été proposé dès le début des années 2000, alors que le concept d'agriculture de précision (*precision agriculture*) est présent depuis le milieu des années quatre-vingt-dix dans la littérature. Le nombre d'articles (en journaux ou conférences) sur l'agriculture numérique (« *Digital Agriculture* » dans le titre, mots clés et résumé) a stagné en-dessous de 10 par an jusqu'en 2017, après quoi il connaît une croissance exponentielle, avec 59 publications en 2019, dont 6 issues d'un numéro spécial du *JNAS – Wageningen Journal of Life Sciences* (pour 1 000 publications en 2019 sur l'agriculture de précision) et 94 publications en 2020. Le concept est donc encore naissant, y compris en recherche. Dans la sphère politique, c'est vers les années 2010-2015 que son importance se renforce, avec des rapports d'experts et des prises de position politiques favorables au développement du numérique en agriculture, aux USA (*The Hale Group & LSC, 2014*), en France (Rapport « *Agriculture innovation 2025* » en 2015¹³), en Europe (Déclaration « *A smart and sustainable digital future for European agriculture and rural areas* »

12. L'amélioration des semences est un champ très vaste allant de la génomique (connaissance des potentiels génétiques) au phénotypage (mesure de l'expression de ces potentiels) et aux relations entre les deux ; l'agriculture numérique aborde l'amélioration génétique *via* le phénotypage, du fait des possibilités accrues de caractérisation des plantes ou des animaux, amenées par les nouveaux capteurs ; elle n'intègre pas la recherche génomique, qui est menée en amont.

13. <https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf>

en 2019¹⁴), ou au niveau mondial (*Dinash et al.*, 2017 ; *FAO*, 2019 ; *OCDE*, 2019). En France, le numérique, les objets connectés, l'agriculture de précision, la valorisation des données, sont identifiés comme des technologies-clés du domaine de l'agriculture et de l'agroalimentaire (*DGE*, 2019).

Ainsi, le développement du numérique, apparemment inéluctable dans la chaîne agroalimentaire, est souvent vu par les gouvernements et les experts comme une opportunité à saisir pour contribuer à l'évolution de l'agriculture, au bénéfice des agriculteurs, des consommateurs et plus généralement de la société. Qu'en est-il réellement ? Comment des instituts de recherche comme INRAE ou Inria peuvent-ils accompagner cette mutation ?

L'ambition de ce livre blanc est d'instruire ces questions. Celles-ci ont déjà été abordées ces dernières années par de nombreux ouvrages, mais peu de livres blancs (parmi les plus complets, citons *Isaac et Pouyat*, 2015 et *Scandurra et al.*, 2020). L'originalité de ce livre blanc sera d'étudier dans quelle mesure le numérique peut contribuer à l'agroécologie et comment orienter les recherches en ce sens, en tentant de répondre à la question suivante : quelles sont les recherches nécessaires pour comprendre, maîtriser, préparer et accompagner le déploiement du numérique en agriculture et dans la chaîne alimentaire, en prenant en compte la manière dont il va transformer les filières et leur écosystème, avec comme objectif de le mettre au service de l'agriculture, des agriculteurs et du bien commun ? Nous avons pris le parti de nous concentrer sur les besoins en recherche, et de ne pas aborder le domaine de l'innovation, qui est très dynamique et donc très mouvant – avec de nombreuses startups dans le le domaine – ce qui aurait rendu l'ouvrage rapidement obsolète. Nous étudierons en particulier le rôle que le numérique peut jouer pour le développement de l'agroécologie et des systèmes alimentaires durables. Nous souhaitons, avec cet ouvrage, apporter un état des lieux de l'existant, et proposer des voies qui, nous l'espérons, nous mèneraient collectivement à une recherche et une innovation responsables en agriculture numérique (*Owen et al.*, 2012).

Le livre blanc est bâti selon le plan suivant : dans un premier temps seront présentés les enjeux de la transformation des chaînes agricoles et alimentaires ; puis un état de l'art permettra de faire le point sur les technologies existantes ; les opportunités offertes par le numérique, au sens large, seront ensuite explorées, ainsi que les risques liés à un développement non maîtrisé de l'agriculture numérique. Le cœur de la réflexion fera enfin émerger les questions et défis techniques qui se posent pour développer l'agriculture numérique du futur, notamment ceux qui pourront mobiliser les équipes de recherche de nos deux instituts.

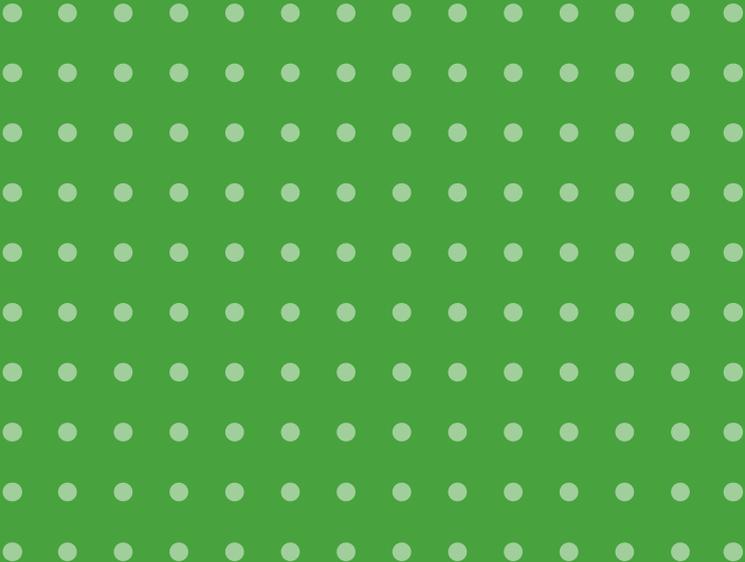
14. Disponible sur <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/eu-member-states-join-forces-digitalisation-european-agriculture-and-rural-areas>



Quels défis pour l'agriculture ?

Auteurs – Benoît Dedieu, Emmanuel Prados.

*Remerciements (contribution, relecture, édition) – Véronique Bellon-Maurel,
Ludovic Brossard, Frédéric Garcia, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*



L'agriculture est d'ores et déjà confrontée à de nombreux défis. Ils concernent la sécurité alimentaire, les impacts environnementaux de l'agriculture et les modes d'organisation des filières. Le numérique peut-il aider à construire un futur désirable pour répondre à ces enjeux ?

2.1 La sécurité alimentaire mondiale sous tension

La population mondiale a actuellement un taux de croissance annuel de 1,1 % et atteindrait autour de 9,5 milliards de personnes en 2050 selon le scénario médian de l'ONU. Cette croissance de la population génère une augmentation très importante de la demande alimentaire mondiale qui est aussi accélérée par le développement rapide et le changement de régime alimentaire de la Chine (Bai et al., 2020). Le système agroalimentaire mondial est de plus en plus sous contraintes, d'autant plus qu'il repose sur nombre de ressources non renouvelables, de plus en plus rares ou de plus en plus dégradées (eau douce, phosphore, pétrole, sols cultivables...). Ce système va subir de plein fouet et rapidement le changement climatique de par ses effets directs (phénomènes climatologiques extrêmes, sécheresses, etc.) comme indirects (fonte des glaciers, prolifération et propagation d'espèces et organismes nuisibles, de maladies, montée du niveau de la mer) (GIEC, 2014 ; UNESCO, 2019). Il est aussi menacé par l'effondrement de la biodiversité actuellement en cours sur les semences, pollinisateurs, auxiliaires des cultures..., qui met en danger de nombreux services écosystémiques nécessaires à son bon fonctionnement (FAO, 2019a). Les conflits d'usage sur les produits, la terre et l'eau vont également s'amplifier avec par exemple la valorisation énergétique de la biomasse et la mise en place de programmes d'afforestation/reforestation pour la capture de CO₂ (techniques dites « d'émissions négatives » désormais indispensables dans tous les scénarios du GIEC limitant l'augmentation de température à 2°C). De plus, pour un certain nombre de céréales critiques¹⁵ pour la sécurité alimentaire, les rendements agricoles semblent avoir atteint leurs limites dans les pays développés¹⁶. Enfin, le système agroalimentaire actuel est peu résilient. Il dépend par exemple de ressources globalisées mal réparties sur le globe (phosphore, pétrole, etc.) et de tout un ensemble de systèmes exogènes potentiellement fragiles tels que les systèmes de transport et de logistique à flux tendu, les marchés mondiaux et la finance (spéculation, volatilité des prix...),

15. i.e. qui constituent la base des régimes alimentaire.

16. Voir par exemple les analyses de l'académie d'agriculture de France sur l'évolution du rendement moyen annuel [du blé France entière de 1815 à 2018](#) et sur celle [du maïs de 1960 à 2017](#).

les flux de travailleurs saisonniers migrants. La crise sanitaire de la Covid-19 a mis en évidence quelques-unes de ces fragilités¹⁷.

La tension grandissante entre offre et demande nous amène à un risque de pénurie alimentaire à moyen terme à l'échelle mondiale et à de nombreuses conséquences géopolitiques (Brown, 2012). Les dernières statistiques de la FAO montrent que la faim progresse de nouveau (FAO, 2017). Il existe cependant des leviers et des marges de manœuvre potentiellement très importants comme par exemple des changements de régime alimentaire dans les pays développés, la réduction drastique des pertes et gaspillages (FAO, 2019b), les capacités de recyclage et de valorisation des sous-produits et coproduits, l'amélioration des techniques de production ainsi que les modes d'organisation du système agro-alimentaire de façon à augmenter sa résilience et ses capacités d'adaptation. Ces leviers sont probablement à notre portée, mais il est crucial d'avancer très vite sur ces questions.

Parallèlement à ces enjeux de sécurité alimentaire, l'OMS observe que 13 % des adultes dans le monde sont obèses. Cette autre face de la malnutrition et le développement de maladies chroniques afférentes (cancer, diabète, accidents cardiovasculaires) sont d'autres points de critiques du système agroalimentaire, notamment *via* la fabrication d'aliments ultratransformés et bien souvent très riches en sucres. Il en est de même pour l'utilisation des antibiotiques comme facteurs de croissance dans certains modèles d'élevage. Ces questions de santé liées à l'alimentation sont de plus en plus présentes (cf. en France les États généraux de l'alimentation et la loi Égalim¹⁸ en 2017-2018). Elles conduisent à la recherche d'une alimentation saine et durable, accessible à tous, plutôt de proximité, agro-écologique et avec des processus de transformation réduits ("*minimal processing*").

17. Voir par exemple le communiqué de presse du Cirad du 29/04/2020 (<https://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/communiques-de-presse/2020/pandemie-coronavirus-menace-agriculture-alimentation>) et l'analyse de l'association les Greniers d'Abondance du 16/04/2020 (<https://resiliencealimentaire.org/covid-19-qui-veille-au-grain-pour-demain-lanalyse>).

18. Voir le numéro 1566 (2017) du magazine Alim'agri du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation qui résume les différents chantiers <https://agriculture.gouv.fr/alimagri-les-etats-generaux-de-lalimentation>. La loi Égalim (agriculture et alimentation), qui fait suite à ces travaux a été promulguée en 2018.

2.2 De l'urgence de réduire les impacts environnementaux négatifs de l'agriculture

Le système productif agricole basé sur une agriculture intensive a une responsabilité majeure dans l'effondrement en cours de la biodiversité (*Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019*)¹⁹, la dégradation de la fertilité des sols et celle de la qualité de l'eau (*Caquet et al., 2020*). Il est urgent de réduire de manière drastique l'usage des produits phytosanitaires et des fertilisants minéraux, et plus généralement de réconcilier l'agriculture et l'environnement. Enfin, il s'agit de repenser nos interactions avec les écosystèmes dits « naturels », la faune sauvage, les réserves de biodiversité forestière et pastorale, « naturel » ne voulant pas dire en dehors de toute intervention et activité humaine. Améliorer le bien-être des animaux de rente est tout aussi essentiel : il s'agit de considérer les animaux comme des sujets, à la fois sensibles, dotés de conscience, coopérant avec l'éleveur, et non plus seulement comme des objets dotés d'un fonctionnement biologique et ainsi de concevoir des systèmes d'élevage respectueux des animaux, leur prodiguant une bonne vie et une mort acceptable (*Porcher, 2011*).

La circulation des zoonoses (la Covid-19 et d'autres zoonoses récentes telles que H1N1) nous rappelle la porosité entre le monde animal – sauvage et domestique – et le monde des humains du point de vue de certaines maladies. De fait, d'après l'OIE (organisation internationale de la santé animale) plus de 60 % des maladies infectieuses humaines sont zoonotiques et ce chiffre augmente si l'on s'intéresse aux maladies infectieuses émergentes (70 %)²⁰. Plus généralement, les interactions entre les santés animale, humaine et celle des écosystèmes conduisent désormais à penser « une seule santé » (*Gibbs, 2014 ; Zinsstag et al., 2015*).

Enfin, l'agriculture est le troisième poste d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France (19 % du total national en 2018) (*CITEPA, 2018*). Les engins agricoles et sylvicoles ne représentent que 12 % de ces émissions quand l'élevage en représente 48 % (principalement *via* les émissions de méthane) et les cultures 40 % (principalement *via* l'émission de protoxyde d'azote lors de la fertilisation des sols). Les émissions agricoles ont diminué de 8 % entre 1990 et 2018 (les émissions nationales de GES ont augmenté dans le même temps de 6 %). Il faudra donc découpler les transformations et efforts pour être compatibles avec la stratégie

19. En trente ans, près de 80 % des insectes ont disparu en Europe.

20. Voir <https://www.oie.int/fr/pour-les-medias/une-seule-sante/>

nationale bas carbone²¹ de la France et ses engagements dans les *accords de Paris*. Dans ce contexte, les cultures, les forêts et les espaces de prairies et de parcours pourraient nous être de grand secours car ils jouent un rôle important dans le stockage du carbone²². Le projet « 4 pour 1 000 » engagé par INRAE vise par exemple à augmenter chaque année de 0,4 % le stockage de carbone dans tous les sols agricoles du monde (soit l'équivalent à l'échelle mondiale des émissions annuelles de CO₂ liées aux activités humaines)²³, en développant des pratiques culturales comme les cultures intermédiaires, l'agroforesterie intraparcellaire et les prairies temporaires dans les rotations culturales.

2.3 Des dynamiques agricoles qui ont favorisé intensification et spécialisation

L'activité agricole est partie prenante de filières où se construisent, se verrouillent, mais aussi se transforment et s'inventent des modèles de production agricole et de transformation. Le modèle agroalimentaire impose à tous les maillons de la chaîne des impératifs de compétitivité et de sécurité sanitaire coûteux liés aux *process* et à la mobilité des produits. Ces filières s'insèrent dans des régimes sociotechniques²⁴ dont la première logique est celle de la compétitivité par les prix (le plus bas possible). Cette logique est permise par l'accroissement de la productivité globale du travail avec la substitution de ce facteur par du capital (sous la forme de machines de plus en plus performantes et de bâtiments automatisés et à l'ambiance contrôlée) et par une mise en concurrence de la main d'œuvre ; elle est exacerbée par la mondialisation. Le fonctionnement de ce système repose de fait sur des usages intensifs de toujours plus de technologies de plus en plus sophistiquées et dont les usagers ont tendance à devenir progressivement dépendants (machines agricoles, biotechnologies, pesticides, etc.). Ceci mène entre autres à la diminution régulière

21. La stratégie SNBC 2018-2019 vise une réduction de 18 % des émissions du secteur agricole en 2030 par rapport à 2015 et de 46 % à l'horizon 2050. Elle vise une réduction globale de 40 % des émissions de gaz à effet de serre en 2030 (par rapport à 1990) et la neutralité carbone, soit zéro émission nette à l'horizon 2050.

22. Par exemple, les forêts stockent l'équivalent de 15 % des émissions de GES nationales d'après l'ONF.

23. L'initiative « 4 % sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », lancée par la France à l'occasion de la Conférence de Paris sur le climat (COP-21), propose d'augmenter chaque année de 0,4 % le stock de carbone présent dans tous les sols du monde. Ce chiffre résulte d'un calcul initial simple, considérant que l'ensemble des émissions annuelles de CO₂ dues aux activités humaines représente actuellement, au niveau mondial, l'équivalent de 0,4 % du stock de carbone (C) des sols de la planète (environ 2 400 gigatonnes de C). Un stockage annuel de 4 pour 1 000 (4 % ou 0,4 %) sur toute la profondeur du sol compenserait alors l'ensemble de ces émissions.

24. Au sens de Geels (2002) et du cadre de la « multi level perspective » : un régime est un réseau tissé entre différents acteurs économiques et sociaux autour d'un produit, d'un service ou dans notre cas d'un modèle agricole. Les acteurs privés et coopératifs des filières en sont partie prenante, mais l'enseignement, la recherche, le système de conseil aux agriculteurs, les politiques publiques nationales ou européennes etc. peuvent renforcer le régime volontairement ou non.

des emplois agricoles dans tous les pays de l'OCDE dont la France²⁵ et à la spécialisation d'un nombre croissant d'exploitations dans un unique secteur productif. Des fermes individuelles aux consommateurs en passant par la PAC (Politique Agricole Commune), les centrales d'achat et les multinationales oligopolistiques, l'organisation de ce système est animée par des tensions et des rapports de forces déséquilibrés entre des acteurs ayant des intérêts divers, parfois divergents, favorisant les verrouillages. L'activité agricole s'insère par ailleurs dans des territoires dont beaucoup se sont spécialisés, entraînant par exemple la dissociation spatiale des productions animales et végétales et la concentration géographique des filières. Tout cet ensemble forme un système d'une grande complexité, caractérisé par la spécialisation et l'interdépendance de ses éléments à différentes échelles, qui a un coût très important en termes de ressources consommées. Cela amplifie les instabilités et multiplie les risques de défaillances. Cela constitue enfin un frein considérable aux changements.

2.4 Quels modèles agricoles pour demain ?

Le débat sur les modèles agricoles qui seraient susceptibles de répondre au mieux aux défis est largement ouvert, notamment depuis que l'agriculture biologique prend de l'ampleur en France (elle représente désormais 8 % des surfaces) et avec la promotion de l'agroécologie. Ces débats dépassent le cadre national et ils ont acquis une consistance internationale. En 2016, le HLPE (*High Level Panel of Experts*) de la FAO proposait de traiter de l'avenir de l'agriculture (élevage inclus) avec deux modèles types : celui de l'intensification durable et celui de l'agroécologie (HLPE, 2016). Le premier se situe dans le prolongement des tendances actuelles d'amélioration de l'efficacité des processus et d'insertion dans des logiques de filières longues. Il s'appuie sur les connaissances scientifiques les plus pointues et sur les avancées technologiques permises par l'agriculture et l'élevage de précision ainsi que la génomique. Le second modèle type promeut une agriculture fondée sur des fonctionnements naturels et une inclusion dans des systèmes alimentaires de proximité et souverains. Il privilégie la diversité sous toutes ses formes (biodiversité, diversité et intégration des activités agricoles et d'élevage), les apprentissages entre pairs et la recherche de cohérences de systèmes tournés vers l'autonomie vis-à-vis des intrants et l'économie de charges. L'agriculture biologique en est une déclinaison (voir encadré Métaprogramme Métabio d'INRAE). Ce modèle est de plus en plus soutenu par le monde associatif et les collectivités locales qui développent des projets alimentaires territoriaux

25. Dans certaines régions du monde, et en premier lieu en Afrique, les dynamiques démographiques et le peu de perspectives offertes par les secteurs de l'industrie et des services requièrent d'intégrer dans les défis pour l'agriculture la création d'emplois en milieu rural et périurbain. Ceci concerne aussi certains territoires d'arrière-pays en France.

et qui sont fortement déterminés à promouvoir des filières courtes. Des modélisations plus fines ont aussi été proposées ; en particulier *Therond et al.* (2017) distinguent huit modèles agricoles positionnés sur deux axes : dépendance aux intrants *versus* la mise en œuvre des services écosystémiques ; ancrage territorial des produits alimentaires *versus* filières longues.

Par exemple...

Le métaprogramme « **INRAE METABIO** » lancé en 2019 et dédié au « Changement d'échelle de l'agriculture biologique » propose d'explorer l'hypothèse où l'offre nationale de produits issus de l'agriculture biologique deviendrait majoritaire, dans un contexte de forte demande et de transition agroécologique. Les enjeux, les leviers et les conséquences du changement d'échelle de l'agriculture biologique sur l'ensemble du système agroalimentaire sont étudiés. L'objectif est d'élaborer des propositions scientifiquement étayées pour anticiper les conséquences et accompagner le déploiement des systèmes agralimentaires AB.

Un deuxième type de débat sur les modèles tourne autour des caractéristiques structurelles des exploitations qui pourraient relever les défis énoncés plus haut. L'agriculture familiale se distingue alors de modèles plus capitalistiques, dont l'agriculture de firme décrite par *Gasselin et al.* (2015) ainsi qu'*Hervieu et Purseigle* (2013). Dans le premier cas, le capital et le travail sont aux mains de la famille alors que dans le second, le capital est détenu par des acteurs non agricoles et tous les travailleurs sont des salariés. Ce dernier préfigure une agriculture des *mégafermes*²⁶ qui fonde sa cohérence sur le très haut niveau de productivité du travail, rendu accessible par de très grandes dimensions, et par une mécanisation et, de plus en plus, une automatisation adaptée.

Il y a des croisements entre ces deux typologies de modèles car l'agroécologie est plutôt familiale quand l'intensification durable est plutôt capitaliste. Mais la diversité des systèmes ne saurait se résumer à ces archétypes. Les situations hybrides d'une agriculture dite « du milieu » sont par ailleurs légion. Enfin, leur confrontation dans le débat sociétal ou professionnel n'exclut pas les formes de coexistence dans les territoires, qui peut être spatiale, autour du travail (des échanges), et dans l'approvisionnement alimentaire des villes. Quel que soit le modèle, les actifs agricoles veulent des revenus corrects et un travail décent (*Ghai,*

26. La plus grande ferme du monde est localisée en Chine avec approximativement 40 000 vaches laitières, une plus grande (100 000 vaches) est en construction... Bien au-delà de notre très controversée ferme de 1 000 vaches !

2003), c'est à dire qui préserve la santé, la protection sociale et la capacité des personnes à peser sur leur devenir. Ils veulent aussi un travail qui ait du sens, de l'utilité et de la beauté et qui préserve les relations avec les autres.

2.5 L'inscription territoriale de l'agriculture

L'inscription territoriale de l'agriculture est un autre élément qu'il faut positionner dans ce débat sur les modèles agricoles. La question de l'inscription territoriale des modèles s'articule autour de plusieurs nécessités : celle du développement économique et social de ces territoires, celle de l'augmentation de leur résilience, celle de leur qualité environnementale et celle des opportunités d'intégration des activités favorisant la valorisation locale des sous-produits. En quoi les modèles agricoles permettent-ils de réduire les flux de matières et d'énergie ? Quelles sont les bonnes échelles de relocalisation et de rediversification des productions et des activités ? Comment les relations ville – campagne, des circuits courts, l'agriculture à proximité des villes permettent-ils de répondre à ces nécessités ? Quels stratégies et outils mobiliser (signes de qualité territoriaux comme AOP, AOC, etc.) ? Comment favoriser l'emploi et assurer une valorisation économique suffisante ? Toutes ces questions positionnent le territoire (constitué de ses espaces, ses activités et ses acteurs) comme une entité incontournable dans le traitement des enjeux que doit relever l'agriculture notamment *via* :

- l'analyse des modalités de coexistence et de confrontations des modèles agricoles (*Gasselín et al.*, 2021) dans les systèmes alimentaires ;
- la conception des processus de transition agroécologique territoriale (*Bergez et al.*, 2019) ;
- la fourniture d'informations et d'outils d'aide à la décision aux porteurs d'enjeux et aux collectivités territoriales et services de l'État concernés par les dimensions environnementales et de santé qui relie agriculture et autres composantes des espaces formant écosystèmes, hydrosystèmes et pathosystèmes.

Conclusion

Pour résumer, l'agriculture est désormais confrontée à des enjeux critiques de sécurité alimentaire, de pollutions et de ressources qui remettent en question les dimensions productives de l'activité et l'exercice de la profession d'agriculteur. Ils nous interrogent sur les modèles agricoles susceptibles de leur répondre. Ils nous interrogent aussi sur les territoires dans lesquels interagissent, se confrontent ou coexistent les déclinaisons concrètes de ces nouveaux modèles. Notons qu'ils relèvent de dynamiques différentes, selon les régimes sociotechniques auxquels ils sont rattachés. Souvent adossée à la ferme de grande dimension avec

peu de main-d'œuvre, l'intensification durable est rattachée aux évolutions du régime dominant, celui issu des Trente Glorieuses, qui a pris appui tout autant sur les (grandes) entreprises privées d'amont et d'aval, les grandes coopératives, le conseil issu des chambres d'agriculture, la PAC que sur une recherche au service de la prescription de solutions techniques valables dans la plupart des milieux. L'agroécologie relève encore de la niche sociotechnique, même si l'on peut constater un vrai changement de priorités de plusieurs acteurs, notamment de la recherche mais aussi des politiques publiques et de l'enseignement. L'agroécologie est aussi associée à l'idée de transition et de transformation radicale. Elle appelle au développement de connaissances, méthodes et outils explorant les leviers de cohérence et les performances de systèmes agroécologiques. Elle accompagne enfin des processus de changement, facilitant l'exploration des situations désirables, les apprentissages, des mécanisations adaptées et aidant la reconfiguration pas à pas des systèmes dans un contexte d'incomplétude des connaissances et d'incertitude sur l'effet des actions.

Dans ce contexte, le numérique est d'abord envisagé, du côté de l'agronomie et des sciences sociales, au travers de son incorporation dans les outils, machines et robots, pour la précision des informations qu'il procure et les nouveaux régimes d'aide à la décision qu'il soutient. En cela, il permet de renverser la dynamique de simplification des raisonnements et des actions qui étaient la contrepartie de l'agrandissement des surfaces exploitées par actif. En fournissant les outils pour observer et gérer ces surfaces grandissantes, le numérique agit alors comme un levier de l'intensification durable et de l'agrandissement des structures, ce dernier devenant compatible avec précision et individualisation. Parallèlement, le numérique pourrait apporter aussi des contributions au développement du modèle agroécologique dans des fermes familiales. En effet, d'une part ce dernier modèle est fondé sur des dialogues et apprentissages entre pairs et sur des liens directs avec les consommateurs : les forums, sites d'achat en ligne et autres réseaux sociaux pourraient ainsi devenir des leviers effectifs. D'autre part, même si cela reste à confirmer, le numérique peut aider à la compréhension et la gestion de la complexité biotechnique, écologique et socioéconomique de ces systèmes basés sur l'agriculture agroécologique, sans doute plus familiale et de taille plus modeste. Il peut aussi « équiper » l'agriculteur pour détecter plus vite les dysfonctionnements et l'aider à prendre des décisions (des informations « supports » de décision)

L'échelle territoriale est une autre échelle d'intérêt pour le numérique, dans sa capacité à appréhender les processus complexes mettant en lien espaces, activités et acteurs et à explorer des scénarios utiles pour l'aide à la décision multiacteur, que celle-ci relève des systèmes alimentaires, des questions environnementales ou de plus en plus des questions de santé (maladies infectieuses animales ou zoonotiques) (*Charrier et al., 2020*).

Au final, pour permettre une transformation rapide et à la hauteur des enjeux, il est alors nécessaire de questionner le numérique dans sa capacité à répondre aux différents acteurs et parties prenantes (publics ou privés) et à leurs besoins urgents :

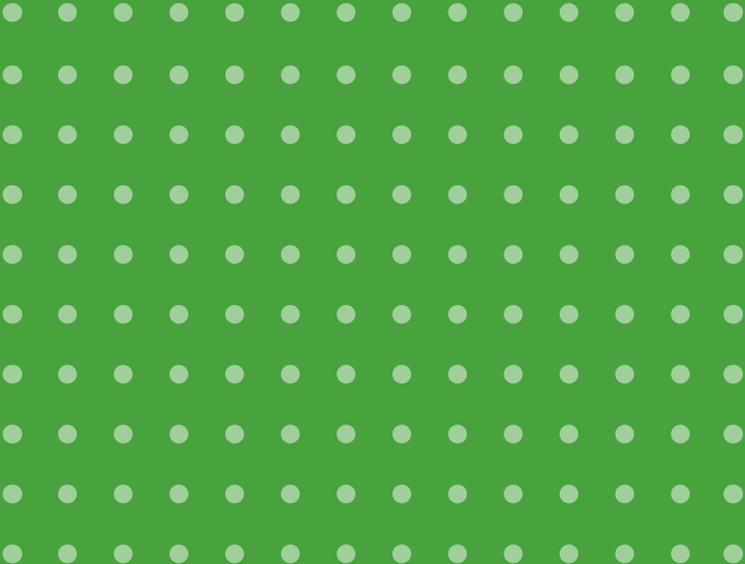
- d'informations, de compréhension de la complexité des systèmes, des risques et des incertitudes ;
- d'appui à l'élaboration de stratégies et politiques, et à l'évaluation multicritère de fonctionnement ou de scénarios, aux différentes échelles (européenne, nationale, régionale et territoriale) ;
- d'appui à la décision et à la gestion de compromis en situation mono et multiacteur ;
- et enfin d'appui à l'action concrète dans ses composantes reliant l'Homme, la machine et la tâche d'une part et le dialogue expérientiel entre pairs d'autre part.



Fondements et état de l'art

Auteurs – Nathalie Mitton, Ludovic Brossard, Tassadit Bouadi, Frédéric Garcia, Romain Gautron, Nadine Hilgert, Dino Ienco, Christine Largouët, Evelyne Lutton, Véronique Masson, Roger Martin-Clouaire, Marie-Laure Mugnier, Pascal Neveu, Philippe Preux, Hélène Raynal, Catherine Rousset, Alexandre Termier, Véronique Bellon-Maurel.

Remerciements (contribution, relecture, édition) – Isabelle Piot-Lepetit.



Après avoir décrit au chapitre précédent les enjeux de l'agriculture et en particulier ceux de l'agroécologie et des systèmes alimentaires durables, qui constitueront la « cible » de nos questionnements, nous abordons ici les fondements des technologies numériques et de leur usage en agriculture, et les recherches en cours. L'introduction a rappelé les piliers de l'agriculture numérique, qu'on peut résumer par la donnée, les capacités de traitement, la connectivité qui permet l'échange des données et informations et enfin l'automatisation. Ainsi, les défis de l'agriculture intéressent tous les niveaux du cycle de la donnée, de sa captation à son exploitation en passant par sa collecte, sa traçabilité, son traitement, son stockage, son interprétation, sa restitution ou son usage dans des systèmes automatisés ou robotisés.

3.1 La donnée

L'usage de technologies numériques en agriculture génère une masse de données fortement hétérogènes, pouvant aller jusqu'à constituer un *"big data"* (Bellon-Maurel et al., 2018) qui se caractérise par sa complexité car il comprend l'observation d'objets et milieux complexes et de natures variées à des échelles spatiotemporelles très différentes (par exemple du gène au champ) avec des interactions fortes intra et interniveaux, et l'implication de nombreux acteurs. Cette complexité amène à se poser des questions sur les données que l'on doit collecter (nature, fréquence, objectif...), afin de guider le déploiement d'une solution technique à tout niveau (matériel, logiciel, interface, etc.).

Captation de la donnée (quoi, pourquoi, où, comment)

Les défis liés à la captation de la donnée sont à la fois matériels et logiciels. Savoir à quoi cette donnée est destinée aide à déterminer le choix du matériel de mesure.

Il faut d'abord spécifier la nature de la mesure (température, taux d'humidité de l'air, du sol, état des feuilles d'une plante, poids d'un animal, etc.) et la précision recherchée. Ces prescriptions qui émanent de la définition des besoins varient fortement d'une utilisation à une autre. Il faut ensuite s'interroger sur la manière de capter cette donnée. La nature, la taille, le poids, l'encombrement et la résistance du capteur dépendront de la nature de la mesure, de l'objet auquel elle s'applique et du milieu dans lequel il sera placé : un capteur porté par un animal sera choisi en fonction du poids et de l'encombrement du matériel et de la taille de l'animal. De même, un capteur pour des mesures en champ sur le sol ou les végétaux nécessitera une protection pour le rendre résistant à l'environnement (humidité, variations de température, résistance aux chocs...). Enfin, l'utilisation de la donnée

permet de définir l'échantillonnage, en particulier le lieu de collecte, la résolution spatiale et temporelle (*Brun-Laguna et al., 2018*) : doit-on déployer un capteur par m² ou par km² ? Dans le cas du suivi de la position des animaux, doit-on équiper tous les animaux du troupeau ou uniquement quelques-uns (*Jabbar et al., 2017*) ? Quelle est la fréquence temporelle requise et doit-elle être constante ? Certaines applications nécessiteront une régularité et des fréquences spatiales et temporelles élevées, ce à quoi la télédétection satellitaire peut répondre. D'autres se contenteront de mesures plus ponctuelles, par exemple de données participatives (*Minet et al., 2017*).

Les choix techniques et matériels ainsi que des méthodologies à mettre en place pour le déploiement des capteurs ont donné lieu à de nombreux travaux durant les deux dernières décennies avec des applications en production animale ou végétale : identification et géolocalisation par RFID (*Ruiz-Garcia et Lunadei, 2011*) ou GPS ; imagerie (2D, 3D, infrarouge, hyperspectrale), accélérométrie, acoustique, mesures biochimiques sur fluides (dont biomarqueurs), automates de mesure tels que balances de pesée, compteurs à eau ou à lait, distributeurs d'aliments, etc. (*Chastant-Maillard et Saint-Dizier, 2016 ; Halachmi et al., 2019*). Dans la plupart des cas, des compromis sont à faire entre coût, résolution, précision et praticité (*Foubert et Mitton, 2019*). Les recherches visent à limiter ces concessions, soit en réalisant des capteurs toujours plus précis, plus économes en énergie, plus petits, moins intrusifs et à moindre coût, soit en concevant des dispositifs d'acquisition massive de données (à base d'images satellitaires, drones...). Le déploiement de nouvelles constellations de satellites (*Sentinel2²⁷*), dont les images à haute résolution spatiale et temporelle sont mises gratuitement à disposition, offre de nouvelles opportunités de suivi.

En conclusion, ces travaux de mise au point de systèmes d'acquisition, par nature pluridisciplinaires, doivent associer agronomes, biologistes, zootechniciens, généticiens, informaticiens, électroniciens et utilisateurs finaux pour satisfaire les attentes des utilisateurs (parfois eux-mêmes chercheurs d'un autre domaine) en combinant la connaissance des objets d'étude, de leurs spécificités et de leurs contraintes, et la connaissance des technologies numériques.

27. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

👁 Par exemple...

Plusieurs unités INRAE mettent au point de tels dispositifs d'acquisition pour le phénotypage ou le suivi des animaux ou des cultures. En voici quelques exemples. L'Unité Mixte de Recherche (UMR) **PEGASE** a développé en collaboration avec l'Institut Technique Agricole **IDELE** et la société **3D Ouest** un portique d'acquisition haut débit d'images 3D et les méthodes de traitement associées pour estimer l'état corporel et la morphologie des vaches laitières. L'Unité Expérimentale (UE) **PEAT** et l'UMR **BOA** ont développé une mangeoire automatique pour étudier les quantités ingérées et le comportement alimentaire individuel des volailles élevées en groupes. Le détecteur électronique de chevauchement « **ALPHA** » (Société Wallace), basé sur un lecteur RFID autonome porté par un bélier, a été conçu par l'UMR **SELMET** pour une détection automatisée des chaleurs chez les moutons notamment en élevage extensif. Dans le domaine végétal, l'UMR **ITAP** et l'Unité Mixte Technologique (UMT) **CAPTE** mettent au point des capteurs optiques, pour le phénotypage ou pour la détection précoce des maladies des plantes. L'UMR **TETIS** utilise la télédétection satellitaire pour détecter des dysfonctionnements dans les parcelles. L'acquisition de données phénotypiques à l'aide de capteurs fait l'objet de programmes et d'infrastructures de recherche de grande ampleur tels que **PHENOME** sur la caractérisation des plantes cultivées, en serre et en champ ou **INSYLVA** sur la forêt. Les données qui en sont issues permettent d'améliorer les capacités prédictives des modèles et leur prise en compte des interactions entre génotypes et environnement. Plus largement, des dispositifs de phénotypage haut-débit sont aussi développés et testés dans les unités expérimentales animales et végétales d'INRAE.

Collecte et transmission de la donnée (Quelle donnée envoyer, quand, comment ?)

Une fois la donnée acquise, il s'agit de la transmettre. Si certains systèmes utilisent des liaisons filaires (Ethernet, série...), celles-ci sont parfois impossibles et les capteurs doivent alors être équipés d'un moyen de communication sans fil, ce qui soulève de nouveaux défis. La captation et la transmission de la donnée en agriculture font de plus en plus appel aux technologies de l'Internet des objets (*Zhao et al., 2010*), en particulier la RFID et les réseaux de capteurs sans fil, avec des spécificités liées à l'agriculture.



Suivi des animaux en élevage extensif © Selmet – CIRAD.

La plupart des capteurs sans liaison filaire reposent sur une énergie limitée (par exemple batterie) et/ou variable (par exemple *via* un capteur solaire) qu'il faut donc préserver. La transmission de la donnée est souvent le facteur le plus consommateur d'énergie et l'un des plus gros défis. On cherchera donc à limiter la quantité de données à envoyer tout en maintenant une fréquence d'envoi nécessaire au bon fonctionnement de l'application. Les recherches se concentrent alors sur le traitement de la donnée dans le capteur, lui-même contraint en capacité de calcul et de mémoire : agrégation spatiale et/ou temporelle des données (*Salim et al., 2020*) ainsi que sur des méthodes d'intelligence artificielle allégées. Par exemple, on exploite la corrélation entre deux grandeurs (comme température et humidité) afin de ne transmettre qu'une des deux valeurs et interpréter la seconde. On peut aussi prédire localement la prochaine valeur mesurée, et ne la transmettre que si elle ne correspond pas à la valeur prédite. Plus une application est exigeante en résolution temporelle ou en précision, plus on devra effectuer d'envois. Il y a donc là aussi un compromis à considérer entre efficacité, précision et coût.

 Par exemple...

Les équipes-projets **FUN** et **EVA** d'Inria travaillent sur la collecte de données pour l'agriculture *via* des réseaux de capteurs sans fil. Elles travaillent à la fois sur les protocoles réseau spécifiques et sur les données à remonter afin de ne pas saturer les médias de communication et réduire la consommation énergétique de ces transmissions. En particulier, l'équipe-projet **FUN** déploie des capteurs dans des vignes en Afrique du Sud pour mieux gérer l'arrosage et la gestion de l'eau et collabore avec Sencrop qui déploie des capteurs dans les cultures de céréales et de pommes de terre. **EVA** déploie des capteurs sur des pêcheurs en Argentine pour prévenir du gel.

Le choix de la technologie de communication dépendra de la quantité de données à remonter, de la distance, mais également du lieu de déploiement des capteurs. La remontée à fréquence faible (par exemple une température une fois par jour) utilisera une technologie longue portée à faible débit et faible consommation alors qu'une mesure exigée à haute fréquence (le suivi des animaux par vidéo) demandera du haut débit. Les points de mesure peuvent se situer dans des zones non couvertes par une technologie cellulaire (de type 3G/4G/5G ou LPWAN – *Low Power Wide Area Network*), ce qui exigera de mettre en place des mécanismes réseaux spécifiques, tels que le routage (action de relayer les données de proche en proche jusqu'à atteindre la station de base), qui doit intégrer les contraintes et exigences des applications et les limitations matérielles et caractéristiques des technologies radio existantes (*Foubert et Mitton, 2021*) et de l'environnement dans lequel les capteurs sont déployés (*Ferreira et al., 2020*). Une difficulté supplémentaire tient à l'hétérogénéité des technologies qui doivent coexister et parfois coopérer, et aux défis plus généraux de l'Internet des objets (IoT), traités par ailleurs dans le livre blanc Inria sur l'Internet des objets²⁸.

Enfin, dans les zones blanches, des solutions mobiles émergent pour moissonner la donnée, de solutions très frugales (des « puits de données » mobiles portables dans des sacs à dos comme le projet *COWSHED* en Afrique²⁹) à des solutions high tech avec des « puits » volants (drones ou nanosatellites). Ces derniers peuvent collecter des données soit à partir de milliers d'objets connectés à faible débit (protocole LoRa), soit à un débit plus élevé (c'est-à-dire 100 kB par transmission) à partir d'un nombre plus restreint (une centaine) de terminaux

28. Les défis scientifiques de l'Internet des objets. Livre Blanc Inria. À paraître.

29. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03102190/document>

au sol (protocole UHF). Les applications dans le domaine de l'agriculture se développent, par exemple en Australie où les agriculteurs contrôlent à distance le niveau des réservoirs d'irrigation par nanosatellites³⁰.

Définition

L'Internet des objets ou *IoT (Internet of Things)* est l'interconnexion entre l'Internet et des objets, des lieux et des environnements physiques. L'appellation désigne un nombre croissant d'objets connectés à l'Internet permettant ainsi une communication entre nos biens dits physiques et leurs existences numériques. L'IoT réunit un grand nombre de technologies hétérogènes, allant de la simple étiquette RFID aux applications sur téléphones portables en passant par les réseaux de capteurs sans fil. Les technologies de communication radio sont diverses et présentent des spécificités différentes en termes de débit, consommation, portée, etc. Les capteurs peuvent présenter des microcontrôleurs plus ou moins puissants et consommateurs d'énergie.

Stockage et échange de la donnée, traçabilité

Une fois les données captées et transmises, elles peuvent avoir différents usages. Premièrement, elles peuvent être stockées et traitées pour en extraire de la connaissance, anticiper des dysfonctionnements, etc. Ces données peuvent être très hétérogènes, de qualité variable, présenter des échantillonnages très différents car elles sont issues de diverses sources (capteurs physiques, capteurs « humains », voire résultats de simulations) et en grande quantité (grand nombre de points de captation, fréquence temporelle potentiellement élevée). Les méthodes issues de la gestion des données multivariées et aujourd'hui du *big data* permettent de répondre aux enjeux de volume, de vitesse de traitement, et de diversité des formats et des sources (Bellon-Maurel et al., 2018). Le préalable pour leur bonne valorisation est que les données répondent aux principes directeurs des « données FAIR » (*Findable, Accessible, Interoperable et Reusable*)³¹, qui garantissent la capacité des systèmes informatiques à trouver, interopérer et réutiliser des données avec une intervention humaine minimale. Ainsi, une nouvelle génération de systèmes d'information adaptée à l'agriculture est attendue pour

30. <https://which-50.com/world-first-australian-iot-uses-satellites-to-monitor-farmers-tanks-rain-levels/>

31. Wilkinson et al. *The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*. Scientific Data 3, 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18.

gérer et structurer ces masses de données complexes en implémentant les principes FAIR. Métadonnées et données doivent être bien décrites, en s'appuyant sur des ressources sémantiques (ontologie, taxonomie, thésaurus), pour être comprises et pour faciliter leur accès *via* des protocoles standardisés.

Par exemple...

À INRAE, des centres automatisés de traitement de l'information (**CATI**) fédèrent et structurent les compétences, méthodologies et technologies pour faciliter la réutilisation des données, comme par exemple le centre automatisé de traitement de l'information **CATI SICPA** (Systèmes d'informations et calcul pour le phénotypage animal), le **CATI Codex** (phénotypage végétal) ou le **CATI GEDEOP** (GEstion des Données d'Expérimentations, d'Observations et de Pratiques sur les agro-socioécosystèmes).

Enfin se pose la question de la validation de la donnée, un sujet qui devient central avec l'accroissement des quantités collectées : la valeur mesurée est-elle correcte ? pour quelles applications et dans quelles conditions ?

Il existe une variété de SGBD (Systèmes de Gestion de Bases de Données), selon le modèle de données utilisé, le modèle relationnel étant aujourd'hui le plus répandu. Par exemple, *Benchini et Stöckle* (2007) ont couplé un modèle dynamique de simulation des systèmes de culture avec une base de données relationnelle afin d'obtenir un stockage et une analyse efficaces de données du modèle, à l'échelle de l'exploitation agricole. Mais lorsqu'il s'agit de gérer de très grands volumes (de l'ordre du pétaoctet), ou des données complexes et hétérogènes (graphes, documents, etc.) dans des contextes fortement distribués (serveurs distants, Internet des objets, etc.), les bases de données de type *NoSQL* exploitant un autre modèle de données – qui relâche certaines contraintes conceptuelles du modèle relationnel – sont plus pertinentes.

Dans d'autres cas, l'utilité principale de la donnée est d'être partagée par des acteurs multiples, par exemple pour limiter des fraudes ou attester certains processus (respect d'un parcours, respect de la chaîne de froid, d'une production locale ou sans insecticides). Un des outils numériques les plus prometteurs actuellement pour assurer cela est la *blockchain* (*Bermeo-Almeida et al.*, 2018). La *blockchain* implémente une base de données distribuée ne nécessitant aucune entité de contrôle, datant et garantissant l'intégrité des éléments qui la composent. En agriculture, elle permet d'enregistrer les étapes de vie d'un produit

et assure sa traçabilité (*Kamilaris et al., 2019*). Ses avantages sont multiples (cf chapitre 4 – opportunités) : transparence, suivi des transactions entre agriculteurs, fournisseurs, acheteurs, consommateurs, etc. Dans certaines filières, la mise en place d'une *blockchain* permet de se passer de certification longue et coûteuse (*Lin et al., 2017*).

Cependant, l'utilisation de la *blockchain* soulève de nouveaux défis numériques et organisationnels. Les risques de piratage informatique inhérents à tout système d'information existent. De plus, les *blockchains*, initialement conçues pour assurer des flux et partages de biens intangibles (monnaie, certificats, diplômes), ne sont pas infaillibles quand le flux informationnel doit être couplé à un flux physique, comme en agriculture et en agro-alimentaire : il faut s'assurer que les données numériques représentent à l'identique le flux physique. Par ailleurs, la confiance instaurée dans une *blockchain* repose sur le mécanisme de « preuve de travail » (des opérations informatiques) qui valide les nouveaux blocs à intégrer. Les *blockchains* publiques s'appuient sur de grandes quantités de « preuves de travail », d'où une très forte consommation énergétique. C'est pourquoi les recherches actuelles se penchent sur la réduction de la complexité de ces algorithmes cryptographiques pour en réduire la consommation.

3.2 Modélisation, simulation et optimisation

Si la donnée constitue un levier majeur de l'agriculture numérique, la modélisation se révèle également indispensable pour relier les mesures et observations aux interprétations et préconisations qui viennent aider les acteurs de la filière agricole à mieux comprendre, piloter et améliorer leurs systèmes de production.

Dans le domaine de l'agriculture et de la recherche agronomique, la modélisation est une démarche scientifique qui a émergé très tôt, avec comme principal objectif la prédiction des récoltes : chez les Égyptiens sous le règne de Sésostris I^{er}, avec l'utilisation des hauteurs de crues pour prédire la richesse des récoltes à venir (*Gros de Beler, 1998*), ou encore chez les paysans incas qui connaissaient plusieurs mois à l'avance les cycles agricoles en observant la nature (*Gutiérrez, 2008*). Bien plus tard, les travaux pionniers de Mendel (*Mendel, 1907*) puis Fisher (*Street, 1990*) ont définitivement légitimé l'utilisation de modèles statistiques dans les domaines de la génétique et de l'agronomie. Dans la seconde partie du XX^e siècle, la modélisation en agriculture s'est particulièrement développée dans l'économie rurale, pour la rationalisation et l'optimisation de la production, de l'agronomie et de la zootechnie, de la conduite des cultures et de l'alimentation animale, et enfin de la sélection génétique végétale et animale. Avec le développement de l'informatique et des premiers calculateurs, les modèles ont alors progressivement dépassé le cadre des

statistiques ou de la recherche opérationnelle, pour reposer de plus en plus sur des formalismes symboliques et algorithmiques pour une modélisation exprimée en termes mathématiques et informatiques où la simulation joue un rôle clé.

La fonction générale d'un modèle est souvent définie comme une fonction de médiation : « Pour un observateur B , un objet A^* est un modèle d'un objet A , dans la mesure où B peut utiliser A^* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A » (Minsky, 1965). Cette médiation peut contribuer à différentes quêtes cognitives : faciliter l'expérience, la formulation intelligible, la théorisation, la communication et la coconstruction des savoirs, la décision et l'action (Varenne et Silberstein, 2013). Aujourd'hui, la modélisation appliquée à l'agriculture concerne un très large spectre d'objets, et vise principalement quatre objectifs : analyser, communiquer, prédire-contrôler l'évolution de diverses composantes d'un système agricole, concevoir-optimiser le système considéré. Dans la suite de cette section, nous présentons quelques grandes classes de modèles, et l'usage qui peut en être fait pour l'agriculture numérique grâce à la simulation et l'optimisation.

Modéliser quoi, pour quels objectifs, avec quels outils

Modéliser quoi ? En agriculture, les objets d'étude, sujets de la modélisation, sont des systèmes naturels anthropisés qui couvrent éventuellement plusieurs échelles et niveaux d'organisation. La modélisation porte sur les composants de ces systèmes, les processus qui régissent leur dynamiques, les événements qui activent ou inhibent ces processus, et les facteurs exogènes qui les influencent (par exemple les conditions météorologiques) (Martin et al., 2011). Les composants sont pour partie de nature biophysique (par exemple les cultures avec les processus de croissance, les maladies) (Kumar et Sinhg, 2003) et une autre partie est centrée sur les rôles joués par les acteurs humains. Dans ce dernier cas, la modélisation peut concerner aussi bien un individu (Martin-Clouaire et Rellier, 2004 ; 2009) qu'un collectif d'individus (par exemple les membres d'une coopérative) et des processus sociaux de coordination d'activités menées par différents individus du collectif (Drewniak et al., 2013 ; Manson et al., 2016).

👁 Par exemple...

De très nombreuses équipes et unités développent des modèles de processus, de flux, d'interactions. Voici quelques illustrations à différentes échelles. Plusieurs unités travaillent à INRAE sur la modélisation de cultures ou en élevage, à l'échelle de la parcelle (modèles de culture multiespèces tels que **STICS**, décrivant la croissance en fonction de variables climatiques et environnementales), de l'individu (modèles de croissance chez l'animal en fonction de l'alimentation et de l'environnement), ou à des échelles plus larges (modèles d'épidémiologie des plantes incluant la dispersion entre parcelles, ou d'épidémiologie animale décrivant les transmissions intertroupeaux, etc.). Les plates-formes de modélisation telles que **RECORD**, **OPEN ALEA** ou **OPEN FLUID** hébergent ces modèles à partir desquels des simulations peuvent être lancées sous différents scénarios climatiques et contextuels.

L'équipe-projet **STEEP** (Inria, CNRS, Université de Grenoble Alpes) développe des modèles numériques pour analyser les flux de matières (production, transformation, échanges, consommation, déchets) dans les filières agricoles et forêt-bois et ainsi 1) appréhender les vulnérabilités amont/aval des filières, 2) questionner l'usage des ressources naturelles et les éventuels problèmes de concurrence d'usage et enfin 3) estimer des empreintes environnementales. Les outils développés reposent sur une modélisation des filières en termes de produits, secteurs et flux pouvant exister entre ces produits et secteurs. Une des difficultés majeures ici est liée au caractère particulièrement lacunaire et incohérent des données.

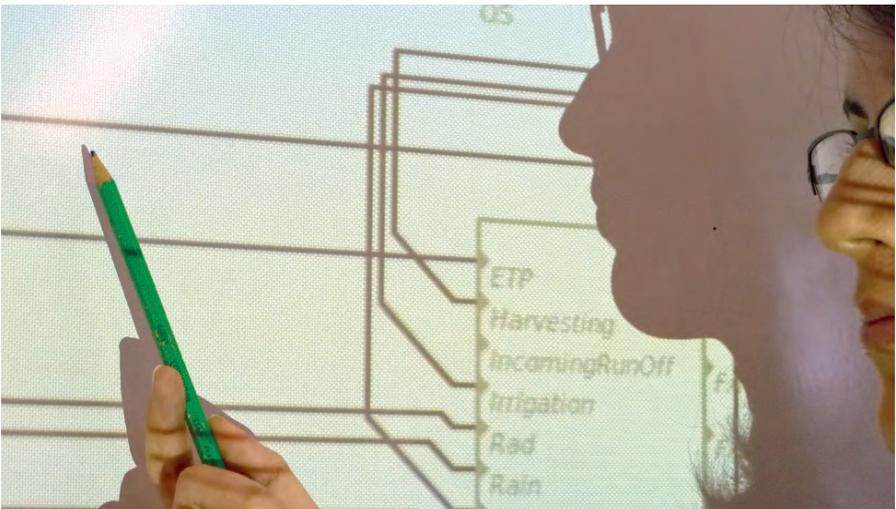
L'équipe-projet **EASE** (Inria, Ecole Nationale Supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, Université Rennes 1) développe un ensemble complet de nouveaux modèles d'interaction, des outils pour augmenter et qualifier les informations issues des systèmes complexes. Ces travaux ont été appliqués à la gestion de l'énergie dans le monde agricole. En particulier, leur modèle permet de définir comment rendre sa consommation plus verte, qu'il s'agisse d'un ancien site à optimiser ou d'un nouveau à équiper. Ils démontrent que l'optimisation d'un seul paramètre (production locale, stockage ou transfert de processus) ne peut à elle seule maximiser l'autoconsommation et minimiser les coûts d'énergie.

Modéliser pour quels objectifs ? Les systèmes au cœur d'une étude sont modélisés à des niveaux de détail déterminés par l'objectif visé et par l'outil envisagé. Les objectifs les plus communément envisagés vont de l'identification des objectifs,

et moyens mis en œuvre dans la gestion des agroécosystèmes à la prédiction des performances (Rio et al., 2019) étant donné différents scénarios, en passant par l'identification des risques et l'examen critique sur le fonctionnement et la conduite des systèmes de production agricole (Li et al., 2019). La modélisation peut également permettre la conception de nouveaux systèmes incluant la configuration et le dimensionnement d'une chaîne logistique (Taghikhah et al., 2021).

👁 Par exemple...

De nombreux modèles concernent le pilotage des agroécosystèmes. Ainsi, l'équipe-projet commune **Inria/INRAE BIOCORE** (CNRS, Sorbonne Université-UPMC) s'intéresse à la modélisation et au contrôle en épidémiologie pour l'agriculture tropicale. À INRAE, l'UR **MIAT** et l'UMR **MISTEA** développent des modèles de simulation et des méthodes d'optimisation dédiées explicitement à la gestion des agroécosystèmes à l'échelle de l'exploitation. Dans le domaine animal, des unités comme les UMR **BIOEPAR**, **SELMET**, **MoSAR**, **UMRH** ou **PEGASE** développent des modèles autour de la santé et de l'épidémiologie animale, des phénomènes dynamiques ingestifs, digestifs et métaboliques, et des systèmes d'élevage. Par exemple, de nouveaux modèles pour ajuster l'apport alimentaire quotidien aux besoins nutritionnels de chaque animal ont été développés à l'UMR **PEGASE** pour l'alimentation sur mesure des truies en gestation et en lactation (Gauthier et al., 2019).



Construire un modèle agronomique. © INRAE

Modéliser comment ? La modélisation informatique pour soutenir l'analyse, la conception ou la gestion d'agroécosystèmes est associée à des approches privilégiant soit la simulation soit l'optimisation (Li et al., 2020). La simulation dynamique met l'accent sur le réalisme de la modélisation des phénomènes jugés importants pour les objectifs de l'étude (Kaghazchi et al., 2021). L'optimisation consiste à faire une exploration algorithmique de l'espace des alternatives qui recherche efficacement une solution optimale selon un ou plusieurs critères explicitement formulés, en utilisant des modèles mathématiques réductionnistes (Ezanno et al., 2020 ; Casagli et al., 2020). Les deux approches ont des objectifs relativement antagonistes (réalisme de la modélisation versus efficacité calculatoire) et, de ce fait, font généralement appel à des modélisations différentes.

Cadres de représentation

Les agroécosystèmes sont des objets complexes dont la modélisation porte d'une part sur le fonctionnement des entités biophysiques qui les composent (le sol, les plantes, les animaux, les flux de minéraux, d'eau, etc.) et d'autre part sur les activités humaines de décision et d'action sur ces entités biophysiques (Zabala et al., 2021). Les modèles véhiculent des connaissances issues principalement de disciplines scientifiques telles que l'agronomie, la zootechnie, les sciences de l'environnement, les sciences de gestion, et les sciences humaines et sociales.

Les modèles biophysiques peuvent être classés en trois grands domaines : mécaniste, empirique et hybride (Reyniers, 1996). La modélisation mécaniste se concentre sur les événements, les relations de causalité et les processus. Par contraste, les modèles empiriques traitent un système comme une « boîte noire » et ne décrivent généralement pas les phénomènes biophysiques sous-jacents. Ces modèles représentent la dynamique entrée-sortie d'un composant du système en termes de données d'observation. En fait, il existe peu de véritables modèles mécanistes ou empiriques. Les modèles sont plutôt hybrides ou classés dans l'une ou l'autre catégorie en fonction de la prépondérance des composantes mécanistes ou empiriques. La compréhension globale et les informations nécessaires pour construire ces modèles augmentent en allant des modèles empiriques aux modèles mécanistes. En rendant la causalité explicite, les modèles mécanistes peuvent être plus complexes, tandis que les modèles empiriques sont généralement plus simples, leur champ d'application étant toutefois limité par la disponibilité de données statistiques.

La modélisation des aspects décisionnels varie suivant l'hypothèse que fait le modélisateur sur l'agent décideur. Dans une première hypothèse, le décideur est supposé parfaitement rationnel (au sens des économistes) et détermine en situation de décision le choix qui est mathématiquement optimal conformément

à des fonctions d'utilité explicitées *a priori*. Selon une seconde hypothèse dite de rationalité limitée, l'agent élabore la décision qui conduit à un résultat qu'il juge satisfaisant compte tenu de l'information disponible et de son niveau d'aspiration. Il est souvent fait appel à des modèles mentaux plus ou moins sophistiqués, dont les modèles à base de règles de décision qui associent des situations à des décisions ou actions (Martin-Clouaire, 2017). Pour faciliter et normaliser le développement de ces modèles on peut s'appuyer sur des ontologies qui définissent les concepts, les relations et autres distinctions qui sont pertinents pour les domaines concernés (grande culture, élevage...) (Roussey et al., 2011). Une ontologie (cf [section 3.4](#)) constitue un modèle abstrait (métamodèle) du domaine et fournit les primitives de représentation permettant d'instancier des modèles de systèmes spécifiques sous la forme de bases de connaissances (Martin-Clouaire et Rellier, 2004 ; Fishwick, 2007).

Définition

Une ontologie fixe un vocabulaire et les liens sémantiques entre les éléments du vocabulaire. Le vocabulaire est composé de noms de concepts (ou « classes »), qui sont les types d'entités connus par le système, et de noms de relations (ou « rôles ») possibles entre ces entités (par exemple, la relation « est bioagresseur de » lie deux entités de type « organisme vivant »). L'ontologie est décrite dans un langage informatique et logique plus ou moins expressif de représentation de connaissances. Elle peut ainsi aller d'une simple taxonomie (un ensemble de concepts structuré par spécialisation progressive) à des descriptions complexes des éléments du vocabulaire et de leurs liens sémantiques. Le langage utilisé permet la mise en œuvre de raisonnements automatiques.

Systèmes à événements discrets, temps discret et temps continu – Un modèle de simulation à événements discrets permet la représentation d'un système dynamique à l'aide de variables dont l'évolution dépend entièrement de l'occurrence d'événements asynchrones au cours du temps. Un cas particulier est celui où la progression temporelle se fait à incrément fixe. L'approche par événements discrets contraste (sans s'opposer toutefois) avec l'approche de type *System Dynamics* dans laquelle l'état du système est modifié en continu dans le temps sur la base d'un ensemble d'équations différentielles définissant les taux de changement des variables d'état. Dans ces différents cas de modèle de simulation, on s'intéresse à la représentation des relations causales, c'est-à-dire, pour la partie biophysique, à des modèles mécanistes. Parmi les formalismes les plus connus citons *Discrete Event System Specification* – *DEVs* (Zeigler et al., 2000) qui s'appuie sur un cadre

générique permettant diverses particularisations à des formalismes spécifiques tels les réseaux de Petri, les automates cellulaires et plus généralement les modèles à pas de temps fixe. Le formalisme mathématique des réseaux de Petri est plus particulièrement apprécié pour sa capacité à représenter la synchronisation de processus exécutés en parallèle et pour les possibilités d'analyse rigoureuse des modèles. Un automate cellulaire est constitué d'un réseau de cellules discrètes et est tout-à-fait approprié pour représenter une dynamique spatiale (par exemple la propagation d'une infestation) et des phénomènes d'auto-organisation (par exemple les dynamiques paysagères de reboisement naturel). Certains formalismes tels que les *statecharts* (Léger et Naud, 2009), les automates temporisés (Hélias et al., 2008) et les réseaux de Petri (Guan et al., 2008) peuvent aussi se prêter à des procédures de vérification du comportement (par exemple pour s'assurer que le modèle ne peut pas se bloquer) ou des propriétés temporelles du modèle.



Détection automatique des mangues par intelligence artificielle à partir d'une photo de smartphone.
© Hortsys – CIRAD.

Modèles à base d'individus ou d'agents – Ces modèles s'intéressent à des systèmes qui peuvent se décomposer en un ensemble d'entités (par exemple plantes, animaux, zones) qui agissent ou interagissent (Daudé, 2004 ; DeAngelis et Diaz, 2019). Couplé à une approche de type automate cellulaire, un modèle à base d'individus permet la représentation spatiale et la simulation de processus biophysiques sur un territoire parcellisé. Lorsque les entités modélisées sont dotées de capacités cognitives et décisionnelles plus élaborées (Bahri et al., 2020), on parle de modèles d'agents qui permettent par exemple de simuler le comportement décisionnel d'un ensemble d'agents (agriculteurs par exemple) opérant sur un territoire (Huber et al., 2018). La gestion des exploitations agricoles a souvent été modélisée en utilisant des mécanismes simples de déclenchement de règles de décision associées aux situations possiblement rencontrées. Il s'avère toutefois difficile avec cette approche de contrôler l'ordre dans lequel les règles sont utilisées et de maintenir la base de règles dès qu'elle atteint une certaine taille. Un enrichissement a été apporté par l'approche BDI (*Belief, Desire, Intention*) (Georgeff et al., 1970 ; Bratman, 1987) qui permet de modéliser le processus par lequel un agent prend ses décisions sur la base d'une perception de la situation courante (*Belief*), d'objectifs déclarés (*Desire*) et d'engagements sur la façon de procéder vers les objectifs (*Intention*).

👁 Par exemple...

Dans l'esprit de l'approche « BDI » et de la planification temporelle et dans l'incertain en intelligence artificielle, l'UR **INRAE-MIAT** a développé plusieurs formalismes pour représenter et simuler le comportement décisionnel des agriculteurs dans leurs activités de gestion de l'exploitation agricole. Par exemple, Martin-Clouaire et Rellier abordent le problème de gestion de production comme celui de la coordination d'un ensemble d'activités organisées dans des plans flexibles dont on peut simuler la mise en œuvre dans un contexte particulier (Martin-Clouaire et Rellier, 2009). Pour des exemples d'application voir Martin et al. (2011) en élevage laitier et Martin-Clouaire et al. (2016) en viticulture.

Modèles à base de contraintes – Les modèles à base de contraintes regroupent un ensemble de formalismes variés qui reposent principalement sur la notion de graphe modélisant des relations binaires entre variables (Hurley et al., 2016). Ces relations peuvent modéliser des corrélations, des influences causales, déterministes ou probabilistes, comme c'est le cas avec les réseaux bayésiens ou les chaînes de Markov. Ces réseaux peuvent également décrire des contraintes entre variables,

portant sur les combinaisons de valeurs acceptables ou non, conduisant à une problématique de satisfaction de contrainte (CSP pour *constraint satisfaction problem*) (Moummadi et al., 2011). Dans un esprit proche, les méthodes de programmation linéaire reposent sur l'optimisation d'une combinaison linéaire de plusieurs variables reliées entre elles par des relations linéaires appelées contraintes (Maqrot et al., 2017).

👁 Par exemple...

À INRAE, l'UMR **BAGAP** travaille sur la modélisation du problème d'allocation dynamique des cultures au sein d'une exploitation agricole, basé sur l'emploi de contraintes spatiales et temporelles et l'utilisation du solveur *toolbar2* (Akplogan et al., 2013). Par exemple, l'équipe s'est penchée sur l'analyse du paysage bocager du pays charolais brionnais pour démontrer l'unicité de ce paysage, sa capacité à incarner les différentes structures et fonctions des haies. Cette analyse a permis l'inscription de ce bocage sur les listes de sites qui pourraient être soumises au patrimoine de l'UNESCO.

Modélisation et simulation

Le principal atout des approches de modélisation est sans doute la possibilité de modéliser et simuler des comportements complexes de systèmes agricoles et, plus largement, de systèmes socioécologiques incluant des agroécosystèmes (Peart et Curry, 1998). Les modèles, en particulier ceux à base d'agents, sont souvent complexes dans le nombre et l'hétérogénéité des composants et des interactions, ainsi que dans la réactivité aux aléas qui pèsent sur ces systèmes. Leur comportement est difficile à étudier parce que les phénomènes qui y interviennent sont non linéaires, avec de multiples discontinuités et rétroactions entre les niveaux d'organisation et les échelles. Certains de ces modèles représentent des agents cognitifs exhibant des comportements de rationalité limitée. De nombreuses applications relatives à l'agriculture se sont appuyées sur les plates-formes CORMAS (Bommel et al., 2015) et GAMA (Taillandier et al., 2010) comme par exemple sur l'étude de la gestion de l'eau, sur la réforme de la politique agricole commune ou encore sur la réduction de la consommation de pesticides et de développement de l'agriculture biologique.

👁 Par exemple...

À INRAE, l'UMR **AGROECOLOGIE** coordonne le développement de la plateforme MAELIA de modélisation et évaluation intégrées des systèmes socioagroécologiques et vise à produire des connaissances sur la structure, le fonctionnement et les performances de ces formes d'agriculture de l'échelle de la parcelle à celle du paysage et/ou du territoire.

En pratique, les approches de modélisation-simulation donnent lieu à des utilisations variées allant de l'analyse en laboratoire faite par des scientifiques, de l'aide à la décision (*Huber et al., 2018*) ou de la prise de décision en temps réel par des agriculteurs ou conseillers agricoles, ou encore du support à des négociations entre acteurs (par exemple des modèles d'accompagnement pour gérer l'eau en commun sur un territoire), à la coconception par un collectif d'agriculteurs de nouveaux systèmes de production ou à des formations. L'agriculteur ou un groupe d'agriculteurs peuvent progresser dans la compréhension du fonctionnement biophysique et glaner des idées d'amélioration du système étudié sur : la qualité des produits, la vulnérabilité du système, les conséquences environnementales des pratiques mises en œuvre, la réduction de surcharge et de pénibilité du travail et, enfin, les performances économiques liées à l'application des principes de l'agroécologie.

👁 Par exemple...

À INRAE, des compétences sont regroupées au sein de **CATI** pour modéliser des systèmes de grande échelle, par exemple les **CATI IMOTEP** (Information, Modèles et Traitement des données en Epidémiologie et dynamique de Populations) et **IUMAN** (Informatisation et Utilisation des Modèles pour les Agroécosystèmes Numériques). Les travaux portent aussi bien sur la modélisation de la propagation d'épidémies chez les végétaux ou les animaux, que sur le développement logiciel de plates-formes et preuves de concepts permettant le partage et l'informatisation de ces nouveaux modèles à de multiples échelles.

Modélisation et optimisation

Par définition, l'optimisation explore selon différentes méthodes les solutions possibles à un problème donné pour trouver un ou des optimums selon un critère ou un ensemble de critères (Zelinka *et al.*, 2013). Elle est utilisée en agriculture dans différents domaines et à différentes échelles (Plà-Aragonés, 2015). Au niveau de l'exploitation agricole, l'optimisation est présente, de façon explicite ou sous-jacente pour l'exploitant, que ce soit pour la formulation d'aliments, la gestion du troupeau, la planification des abattages des animaux, la planification des cultures ou de l'utilisation des terres, ou la gestion de l'eau. L'optimisation est également utilisée à des échelles de groupes de fermes, de territoires, de régions, de pays pour la gestion de l'utilisation des terres, de l'eau, des questions économiques d'échanges et de marché (Carpentier *et al.*, 2015). Dans ce cas, les modèles bioéconomiques sont utilisés dans une démarche d'analyse : l'objectif premier devient l'évaluation de l'impact de l'application des contraintes et des critères sur les solutions optimales.

Du fait de la complexité des systèmes agricoles et de l'évolution des questions liées à l'agriculture, l'optimisation a également évolué en agriculture (Jones *et al.*, 2016). Les premiers modèles économiques dans les années cinquante s'intéressaient surtout à maximiser le revenu. La formulation d'aliment à moindre coût vise encore aujourd'hui principalement à obtenir un aliment le moins cher possible en respectant des critères nutritionnels. Progressivement, l'optimisation est devenue multiobjectif pour combiner différents objectifs productifs (par exemple production animale ou végétale, temps de travail), économiques (par exemple revenus, coût) mais aussi environnementaux (bilans de nutriments, impact environnemental calculé par analyse de cycle de vie, services écosystémiques...). Pour les optimisations « sous contraintes », les contraintes sont également variées : biologiques, structurelles ou réglementaires, mais aussi environnementales et décisionnelles.

L'optimisation pour les modèles en agriculture s'est également appuyée sur l'évolution des méthodes d'optimisation, utilisant un panel varié de méthodes. Les méthodes déterministes de programmation linéaire sont toujours très présentes, avec des adaptations permettant la résolution de problèmes multiobjectifs. Les méthodes stochastiques de métaheuristique sont appliquées seules ou en combinaison avec les précédentes. Ces méthodes de métaheuristique permettent notamment d'aborder l'optimisation multicritère et d'obtenir un ensemble de solutions optimales dites admissibles dans ce cadre (appelé Front de Pareto) ; elles comprennent par exemple les algorithmes évolutionnaires (comme les algorithmes génétiques, ou l'évolution différentielle) qui travaillent sur une population de solutions, l'optimisation par essaim particulaire, la recherche tabou, le recuit simulé, etc. (Kaim *et al.*, 2018 ; Memmah *et al.*, 2015).

Les questionnements actuels autour de l'optimisation portent notamment sur l'adaptation des méthodes à des modèles de plus en plus complexes, avec en particulier la prise en compte de l'incertitude (*Crespo et al., 2010*) et du temporel dans la formulation du problème d'optimisation (*Akplogan et al., 2013*), rejoignant ainsi des questions historiquement traitées dans la communauté de l'automatique et du contrôle optimal. Le couplage entre optimisation et simulation (*Borodin, 2014*) constitue également un front de recherche, en lien en particulier avec les méthodes d'apprentissage par renforcement (*Gosavi, 2015*). Malgré l'évolution technologique autour de la puissance de calcul, le temps de traitement des processus d'optimisation reste toujours une dimension à considérer du fait de la complexité croissante des modèles considérés, et les développements récents autour de la métamodélisation constituent une possible stratégie de simplification pour réduire ces temps de traitement.

👁 Par exemple...

À INRAE, les unités UMR **PEGASE** et **SMART-LERECO** développent des approches d'optimisation multicritère (performance zootechnique et économique, impact environnemental) des stratégies alimentaires en élevage porcin, sur la base d'un modèle de l'exploitation porcine.

Chez Inria, plus d'une vingtaine d'équipes-projets travaillent sur la mise au point d'algorithmes d'optimisation, de recherche opérationnelle ou de contrôle.

3.3 Apprentissage et extraction de connaissances multiéchelle

Les deux sous-chapitres précédents ont présenté les approches utilisées pour collecter les données, puis les techniques de modélisation reposant principalement sur l'analyse humaine. Dans ce sous-chapitre, nous nous intéressons aux grandes familles d'approches permettant de construire directement des modèles depuis les données, et ainsi d'en extraire automatiquement des connaissances. Les connaissances découvertes peuvent soit être présentées à des experts humains, soit rester internes à une approche d'apprentissage et permettre de réaliser des tâches de prédiction ou d'identification par exemple.

Nous montrerons d'abord que les données « brutes » envoyées par les capteurs ne peuvent en général pas être utilisées telles quelles et que leur prétraitement représente un défi en soi. Commençons par présenter les types de données fréquemment utilisées en agriculture numérique, et qui pourront constituer un *Big Data*.

Les données massives en agriculture

En agriculture, les données les plus « massives » sont issues de capteurs à grande résolution temporelle ou spatiale, comme les séries temporelles et les données de télédétection ou de cartographie issues de capteurs embarqués.

Séries temporelles. Une série temporelle est une suite de valeurs numériques représentant l'évolution d'une variable mesurée sur un individu au cours du temps. De telles suites de variables peuvent être modélisées individuellement pour en comprendre l'évolution passée et prévoir le comportement futur, à l'aide de modèles de type ARMA (Box et al., 2015). Aujourd'hui les expérimentations en agronomie permettent d'observer la même variable sur des milliers d'individus (par exemple surface foliaire de milliers de plantes en serre, température d'animaux d'élevage) et sur de longues périodes. L'objectif d'analyse de ces séries temporelles a donc évolué vers la recherche de caractéristiques communes entre ces séries, de différences majeures, ou d'acquisition de connaissance plus fine quant aux mécanismes internes (par exemple effet des génotypes) ou externes (par exemple liés aux variables environnementales) qui influent sur les variables observées. Les séries temporelles sont ainsi étudiées plus généralement comme des fonctions du temps. Elles portent aussi le nom de « données fonctionnelles » ou « longitudinales ».

Données de télédétection. Les données de télédétection sont des images d'une zone donnée, prises par satellite ou par des drones. Les images satellitaires – sur lesquelles nous nous focaliserons par la suite – peuvent être enregistrées à différentes périodes, ces séquences constituant des séries temporelles. Elles peuvent aussi, pour une même période, être issues de satellites différents, chacune ayant un contenu radiométrique différent (i.e. information radar, information optique). La dynamique de la végétation peut aujourd'hui être suivie avec une résolution spatiale compatible avec la taille des objets d'intérêt et une revisite temporelle fréquente grâce aux récentes missions spatiales comme, par exemple, *Copernicus*. La mission satellitaire *Sentinel-1* permet d'acquérir des informations radar (deux bandes) tous les cinq ou six jours sur une même zone à dix mètres de résolution spatiale. Cette source de données permet d'accéder à des informations sur la structure des objets (i.e. biomasse forestière ou agricole) ainsi que de suivre et estimer les surfaces humides et la part de terrains qui ont été irrigués sur une certaine période. Une autre mission satellitaire avec autant d'intérêt

est la mission *Sentinel-2* qui délivre elle aussi des informations tous les cinq ou six jours, toujours à une résolution spatiale de dix mètres, dans le domaine de l'optique multispectrale (treize bandes). Ce capteur optique est particulièrement adapté pour cartographier l'occupation et l'usage des sols, suivre la biodiversité des états naturels ainsi que pour l'estimation de rendements à large échelle sur des grandes surfaces (Lambert, 2018).

À l'opposé de cette échelle, c'est-à-dire vers le microscopique, les données métagénomiques issues du *metabarcoding*³² permettent de mieux caractériser l'environnement biologique des cultures ou des animaux. Ces données métagénomiques sont l'assemblage des « empreintes » des génomes présents ou de leurs expressions (ARN, protéines), ce qui permet d'analyser de nouvelles dimensions des écosystèmes, pouvant mieux expliquer le comportement des cultures ou des animaux. On est seulement au début de l'exploration de ces nouvelles sources de données, dont certaines restent difficiles à obtenir (protéomique, métabolomique..).

Prétraitements des données

Les challenges importants en prétraitement des données sont : i) identifier des données aberrantes ou peu fiables : les données collectées pendant les expérimentations ou sur le terrain sont nombreuses, très bruitées et sujettes à de multiples sources d'erreurs, comme un capteur défectueux. Des outils spécifiques sont donc nécessaires pour annoter ces données, identifier rapidement les capteurs défectueux, diagnostiquer l'hétérogénéité dans le champ ou la serre, afin d'améliorer la qualité des jeux de données pour les analyses futures ; ii) lier données et connaissance de l'expert dans les analyses comme par exemple mimer automatiquement le raisonnement d'un expert quand il valide un « petit » jeu de données, ou utiliser la connaissance de l'expert pour recalibrer des courbes (alignement des dates de stades phénologiques).

Un défi particulier est la fusion de données. Des informations difficiles à obtenir directement peuvent être retrouvées en combinant des données, soit de même nature (par exemple, la surface foliaire d'une plante (une donnée scalaire) est prédite à partir de l'analyse de quinze images de cette plante prise sous différents angles), soit de natures différentes. Pour cela, de plus en plus de données, de

32. Le *metabarcoding* est une méthode d'identification des espèces à partir de segments d'ADN ou d'ARN. En ne ciblant pas d'espèce spécifique mais déterminant la composition d'espèces dans un échantillon, le *metabarcoding* permet l'identification de nombreux taxons dans un assemblage de populations (de [bactéries](#) ou autres micro-organismes) au sein d'un échantillon environnemental (par exemple échantillon de sol, [sédiments](#), [excréments](#)...). C'est ainsi une des méthodes les plus rapides d'[évaluation environnementale](#) de la biodiversité de systèmes écologiques riches en espèces inconnues ou difficiles à déterminer.

natures variées et hétérogènes, sont collectées pour suivre un même phénomène ou une même zone d'étude (données dites « multisources »). Les connaissances contenues dans ces données représentent une vraie opportunité pour mieux comprendre les phénomènes complexes associés aux pratiques agricoles modernes afin de pouvoir, par la suite, mieux les suivre et les gérer. Dans ce cadre général, un des enjeux principaux est aujourd'hui de savoir comment exploiter au mieux ces sources d'informations hétérogènes et complémentaires pour en tirer le maximum d'information (car, en sciences de la complexité, « le tout est plus grand que la somme de ses parties »³³). Selon la typologie des sources impliquées dans le processus, deux stratégies de fusion sont envisageables : la fusion précoce et la fusion tardive. Dans le premier cas de figure, les données sont combinées ensemble au début du processus pour constituer un unique et nouveau jeu de données homogènes. Par exemple, ramener toute l'information disponible à la même résolution spatiale, temporelle ou d'unité d'analyse. Dans ce contexte, une fois le nouveau jeu de données constitué, des techniques classiques de l'analyse monosource peuvent être utilisées. Dans le second cas de figure (fusion tardive), un processus d'analyse est mis en place par chaque source de façon spécifique et la combinaison est faite au niveau des descripteurs ou de la prise de décision. Par exemple à partir de chaque source, des descripteurs propres peuvent être extraits, qui ensuite seront combinés pour exploiter des interactions à plus haut niveau entre les différentes sources considérées. Enfin, les différentes sources peuvent être combinées dans un processus dit "end-to-end", c'est à dire où les étapes classiques de traitement sont remplacées par un système unique (généralement un réseau de neurones profond) qui prend en entrée les sources brutes et renvoie en sortie les décisions attendues (Charvat et al., 2018 ; Plaisant, 2004 ; Tonda et al., 2018).

Dans le cas des séries temporelles, la fusion de séries ayant des résolutions temporelles différentes est un défi important. Par exemple, le capteur d'activité d'un collier porté par un animal envoie des informations toutes les cinq minutes, mais la pesée de ce même animal ne sera faite qu'une fois par jour. Pour comparer les individus entre eux, il peut être alors nécessaire d'interpoler les séries temporelles sur un même support de temps (par des méthodes de lissage linéaires ou polynomiales) en faisant éventuellement correspondre leurs similarités (dates de stades phénologiques, pics de croissance...). Le *Dynamic Time Warping* (Sakoe et Chiba, 1978) est une technique bien connue de mesure de similarités entre deux séries. Cette technique ne répond pas à toutes les questions de recalage de courbes que l'on rencontre autour du vivant, où la prise en compte du temps phénologique est fondamentale. Ces questions constituent un défi encore largement ouvert en biologie.

33. <http://www.scilogs.fr/complexites/le-tout-est-il-plus-que-la-somme-des-parties/>

Il existe également des méthodes capables d'extraire plusieurs modèles des séries temporelles à des échelles temporelles différentes, puis de choisir les plus pertinents grâce à des approches issues de la théorie de l'information (principe de longueur de description minimale – MDL) (Vespier et al., 2012). L'intérêt de ces approches est qu'elles permettent de se focaliser sur l'échelle temporelle des phénomènes observés, et non sur celle de la valeur technique d'échantillonnage.

Dans le cas de la télédétection, avec l'explosion du nombre de missions satellitaires (i.e *Sentinel*, *Spot*, *Pléiades* et *PléiadesNeo*, *PlanetScope*, etc.), il devient possible de collecter, à moindre coût, des informations dans différents domaines spectraux (optique et radar) et à différentes échelles spatiotemporelles qui décrivent une même zone d'étude. Cette quantité massive d'information multi-source requiert le développement de nouveaux outils de gestion et d'analyse de données (Schmitt et Zhu, 2016). Généralement, dans un processus classique de fusion multisource de données d'observation de la Terre, les sources sont exploitées à travers un processus de fusion précoce. Par exemple, dans le cas d'imagerie à différentes échelles spatiales, une étape de rééchantillonnage de l'information pour porter toutes les images à la même échelle spatiale est adoptée au préalable. Malheureusement, ce type de processus peut introduire des biais ou des erreurs dus à la génération de nouvelles informations synthétiques. C'est pour cela qu'aujourd'hui, des approches de fusion tardive sont préférées autant que possible. Des premiers exemples dans le contexte de la cartographie de l'occupation du sol commencent à apparaître mais nous sommes encore loin d'une solution générique pouvant être déployée de façon systématique sur des territoires différents et adaptée aux différents pratiques agricoles.

👁 Par exemple...

À INRAE, l'équipe **MISCA** de l'UMR Tetis développe *Warping*, des méthodes de gestion de l'information permettant de répondre aux grands enjeux sociétaux liés à l'environnement, qu'il s'agisse de stocker, de gérer, de partager ou d'analyser de gros volumes de données. En particulier, elle contribue à la cartographie des sols en appliquant des techniques de *deep learning* sur de très gros jeux de données.

Chez Inria, plusieurs équipes-projets (**GEOSTAT**, **TITANE**, **FLUMINANCE** (Inria, INRAE, Université Rennes 1),...) et l'action exploratoire **AYANA** travaillent sur l'analyse d'images satellitaires.

Au-delà du multisource purement satellitaire, d'autres types d'information sont aujourd'hui associés à des données d'observation de la Terre. Par exemple, des informations géolocalisées « spontanées » ou issues de sciences citoyennes (*Ienco et al., 2019*) ont une grande plus-value pour mieux étalonner et compléter les informations purement physiques des capteurs satellitaires.

Approches supervisées

L'analyse supervisée consiste principalement en deux tâches : la classification supervisée et la prédiction de futures valeurs. La classification supervisée consiste, étant donné une série temporelle et un ensemble de classes prédéterminées (par exemple « animal malade » et « animal bien portant »), à assigner l'une de ces classes à la série temporelle. En pratique, cela peut aider à déterminer l'état d'un animal ou d'une plante à partir de données de capteurs et d'informations sur les différents états possibles. Les méthodes de classification supervisée ont besoin d'être « entraînées » : pour cela, il faut leur fournir un nombre important d'exemples correctement étiquetés avec leur classe. À partir de ces exemples, l'algorithme de classification construit un (ou plusieurs) modèle(s), pour assigner une classe à une série temporelle non étiquetée en fonction des caractéristiques de celle-ci. Les grandes familles d'approche de classification supervisée diffèrent principalement par la manière dont elles construisent ces modèles. Les approches les plus simples, de type *k*-plus proches voisins (*k-Nearest Neighbor* ou *kNN* en anglais), ne construisent pas de modèle mais cherchent les *k* exemples de l'ensemble d'entraînement les plus proches de l'individu à étiqueter, et renvoient l'étiquette majoritaire. La difficulté est de choisir une bonne méthode de similarité (*Karlsson et al., 2016*).

Enfin, les très populaires méthodes de réseaux neuronaux profonds peuvent être utilisées avec succès pour la classification de telles données. La méthode de ce type la plus performante actuellement, *MLSTM-FCN* (*Karim et al., 2019*), combine un bloc convolutif CNN (*Convolutional Neural Network*) avec un bloc LSTM (*Long Short Term Memory*). Le bloc CNN, très utilisé en analyse d'image, sert de filtre qui parcourt la série temporelle ou le spectre et en extrait des attributs caractéristiques au temps *t*. Il est combiné au bloc LSTM, très utilisé en analyse de données séquentielles (en particulier des textes), et qui permet de mettre en relation des valeurs passées et présentes. Ce type d'approche peut donner d'excellents résultats (*Kamilaris et Prenafeta-Boldú, 2018*), par contre plus encore que les autres elle requiert une grande quantité de données d'entraînement étiquetées (qui peuvent être difficiles à acquérir dans certains scénarios agronomiques), et son paramétrage peut se révéler délicat (*Zhu et al., 2017*).

👁 Par exemple...

Chez Inria, l'équipe-projet **STATIFY** (Inria, UGA, CNRS(Inria, CNRS, Institut polytechnique de Grenoble) s'intéresse à la modélisation statistique de systèmes mettant en jeu des données ayant une structure complexe. Ses membres développent des méthodes statistiques pour capturer la variabilité des systèmes étudiés en garantissant un bon niveau de précision et en prenant en compte les valeurs extrêmes reflétant généralement des phénomènes rares. En particulier ils modélisent les événements météorologiques pour l'agroécologie.

Comme exemple de l'utilisation de méthodes de classification supervisée en agriculture, dans *Fauvel et al. (2019)*, les auteurs exploitent des données de capteurs d'élevage de précision provenant de vaches laitières. Ces vaches sont équipées de thermomètres ainsi que de colliers avec un accéléromètre. L'analyse des séries temporelles de température et d'activité physique permet de détecter la période d'œstrus plus précisément que les méthodes existantes ou l'observation visuelle, y compris dans les cas fréquents (30 %) où les vaches n'expriment pas de comportement particulier en phase de pré-œstrus.

Approches non supervisées

Les approches non supervisées permettent de découvrir certaines structures dans les données, que ce soit des regroupements avec le clustering ou des motifs récurrents avec le *pattern mining*.

Clustering. Le *clustering* (ou classification non supervisée) est une méthode d'apprentissage qui a pour objectif d'identifier des classes pertinentes dans les données. À l'intérieur de chaque classe, les données sont regroupées par similarité ou par proximité. Pour obtenir une bonne classification, il faut à la fois minimiser l'inertie intraclasse (pour avoir des classes homogènes) et maximiser l'inertie interclasse (pour avoir des classes bien différenciées). Deux grandes familles de méthodes sont couramment utilisées : i) la classification ascendante hiérarchique, ou CAH, qui cherche à regrouper itérativement les individus, en commençant par le bas (les deux plus proches) et en construisant progressivement un arbre, ou dendrogramme, regroupant finalement tous les individus en une seule classe, à la racine ; ii) la classification par réallocation dynamique (dont l'algorithme des *k-means* est une version très connue) : le nombre *k* de classes est fixé *a priori*.

Ayant initialisé k centres de classes, tous les individus sont affectés à la classe dont le centre est le plus proche au sens de la distance choisie. L'algorithme calcule ensuite les barycentres de ces classes qui deviennent les nouveaux centres. Le procédé (affectation de chaque individu à un centre, détermination des centres) est itéré jusqu'à convergence vers un minimum (local) ou un nombre d'itérations maximum fixé.

Les principaux verrous à lever quand on fait du clustering de données multivariées sont d'identifier le « bon » nombre de classes et de définir une distance adaptée aux données, avec parfois la nécessité de réduire la dimension. Une technique courante est de faire de l'analyse en composantes principales sur les données et d'appliquer ensuite le *clustering* sur les coordonnées des données dans la base des vecteurs propres, avec toutes les difficultés de choix de dimension que cela comporte. Une façon de contourner ces difficultés est de faire du *clustering* par mélange de processus de Dirichlet (Coquet et al., 2002).

Découverte de motifs (*Pattern mining*). Les motifs correspondent à des régularités/irrégularités ou des spécificités implicites des données ou de sous-parties des données. Dans les applications agronomiques, un individu peut être décrit à travers une suite de caractéristiques/événements. Par exemple, une parcelle décrite par une suite d'opérations culturales, une plante décrite par une séquence ADN, etc. Un des grands défis est l'extraction de sous-séquences fréquentes/rares dans ce type de données.

Par exemple...

À INRAE, l'UMR **TETIS** s'intéresse à l'extraction de sous-séquences fréquentes/rares dans ce type de données et de motifs fréquents sous forme d'items et de séquences (suites d'événements ordonnés dans le temps) afin de caractériser la différence de croissance de végétation entre différentes zones spatiales. En particulier, leurs travaux s'appliquent à l'estimation des surfaces humides et au suivi de la biodiversité.

D'autres approches visent à mettre en évidence des sous-parties des données dont les caractéristiques sont très différentes de celles du reste des données (par des différences de distribution sur certains attributs, etc.). Par exemple dans Millot et al. (2020), les auteurs ont exploité la notion de motifs discriminants afin de caractériser, à partir de données de simulations, des sous-familles de protocoles de cultures dans les fermes urbaines dont une partie des attributs (température, lumière, CO₂, etc.) montre une distribution intéressante par rapport à une mesure d'intérêt donnée.

Ces méthodes sont confrontées à un nombre de motifs trouvés trop important pour une utilisation facile par les experts. Une piste prometteuse et très étudiée actuellement est la sélection du sous-ensemble des motifs les plus pertinents. L'extraction de motifs à partir de séries temporelles peut s'effectuer après un prétraitement transformant la suite de valeurs numériques en suite de valeurs symboliques : les méthodes classiques de découverte de motifs s'appliquent alors. Quand les données numériques sont conservées, les méthodes d'extraction de sous-séries représentatives, appelées shapelets, peuvent s'appliquer.

Par exemple...

Des unités INRAE comme l'UMR **PEGASE**, l'UMRH, l'UMR **Toxalim** et l'UMR **GenPhyse** utilisent ces différentes approches d'apprentissage respectivement pour l'alimentation de précision, la détection précoce des anomalies de rythme d'activité de vaches laitières dans un troupeau, la détection de pathologies chez les porcelets ou l'analyse du comportement des truies.

Apprentissage par renforcement

Comme de nombreux types de données, les données agricoles sont souvent incertaines (cf. 3.1). L'apprentissage par le renforcement (en anglais *reinforcement learning*, abrégé RL par la suite) consiste à apprendre à agir dans un environnement incertain. Un exemple d'utilisation moderne du RL pour la planification de la gestion de l'ensemble des cultures a pour origine *Garcia* (1999), basé sur l'interaction avec un modèle de règles de décision pour la culture du blé, Déciblé (*Chatelin et al.*, 2005). Le simulateur empirique de culture est utilisé pour évaluer les politiques exprimées sous forme d'ensembles de règles de décision. Dans *Ndiaye*, (1999), des méthodes sans modèle – à savoir le *Q-learning* et le *R-learning* – ont été mélangées avec des algorithmes génétiques, des arbres de décision et de la logique floue pour trouver des règles de décision optimales pour la gestion des cultures couplées à Déciblé. Le résultat n'a pas été jugé aussi bon que les choix de décision auxquels un expert pourrait s'attendre. Ces premières approches étaient intéressantes dans la mesure où elles ont introduit des techniques modernes de RL pour la gestion des cultures en considérant toute une série d'actions. Elles ont également exprimé une politique optimisée de manière naturelle, c'est-à-dire sous la forme d'un ensemble de règles de décision simples qui correspondent au raisonnement des agriculteurs. Les limites des études de *Garcia* (1999), et *Ndiaye* (1999) sont que l'apprentissage est hors ligne, en utilisant un simulateur de modèle de décision empirique avec ses propres biais et domaine de validité.

L'apprentissage n'étant qu'en différé, les systèmes n'utilisent pas les commentaires des agriculteurs pour améliorer la politique apprise à l'aide du simulateur.

Ces méthodes ont ensuite été appliquées à un cadre plus complexe, en incorporant un modèle économique pour la gestion du colza, et une composante de parasites et de maladies dans la modélisation des cultures (Trépos *et al.*, 2014). Les méthodes de RL ont été appliquées avec succès à la planification de l'irrigation lorsque la disponibilité en eau est limitée (Bergez *et al.*, 2001). Néanmoins, chaque décision de gestion doit être prise en tenant compte de l'ensemble de la séquence des choix. Différentes variétés de cultures ont des besoins en eau différents ; ainsi, il y aura des coûts d'irrigation différents. Bu et Wang (2019) ont proposé une architecture informatique générale pour la prise de décision intelligente en agriculture, basée sur le *Q-Learning* profond. Dans la pratique, le *deep Q-Learning* nécessite des milliards d'essais et d'erreurs. En outre, il n'est pas proposé d'intégrer des connaissances spécialisées (par exemple, des connaissances sur la physiologie des plantes) dans ce système ; des approches utilisant des connaissances expertes pourraient être envisagées (apprentissage basé sur un modèle), permettant de réduire la quantité d'exemples nécessaires pour l'entraînement de plusieurs ordres de grandeur.

Par exemple...

L'équipe-projet **SCOOL** (Inria, CNRS, Université de Lille) spécialisée en apprentissage par renforcement, étudie la recommandation de pratiques dans le domaine de l'agriculture dans le contexte d'exploitations de très petite taille, en particulier dans des pays en voie de développement, et également dans le domaine du jardinage. Ces recherches sont menées dans une perspective de développement durable.

Les diverses méthodes d'apprentissage automatique et de sciences des données sont implémentées dans la bibliothèque scikit-learn, principalement développée à Inria et qui fait partie des trois bibliothèques d'intelligence artificielle les plus téléchargées au monde.

L'unité INRAE **MIAT** travaille également sur le développement de méthodes basées sur les processus décisionnels de Markov et sur l'apprentissage par renforcement appliqués à la gestion des systèmes agroécologiques, en abordant tout particulièrement les enjeux liés à la dimension spatiale des problèmes.

Les entrepôts de données et analyse OLAP

Les entrepôts de données (ED) sont apparus pour gérer de très gros volumes de données issues de sources hétérogènes (*Chandra et Gupta, 2018*). La modélisation multidimensionnelle (*i.e.* données caractérisées à travers de multiples axes d'analyse) et hiérarchique (*i.e.* un axe d'analyse peut être associé à différents niveaux de granularité) est la base des ED, et de l'analyse multidimensionnelle. Par exemple, l'analyse de la quantité de pesticides ou d'azote appliquée par les agriculteurs peut être caractérisée selon plusieurs dimensions (ou axes d'analyse) : temporelle, spatiale, et au niveau de la culture (*Bouadi et al., 2017*). Cela permet de représenter les quantités par type de culture, par saison et par parcelle. Ces dimensions peuvent être exprimées selon différents niveaux de détail. Par exemple, l'information spatiale peut être définie à l'échelle d'une parcelle, ou à une échelle plus générale comme le bassin versant, la région, etc. En effet, chaque parcelle appartient à un bassin versant, qui à son tour appartient à une région, elle-même située dans un pays.

L'analyse multidimensionnelle fait appel à des traitements OLAP (*On-Line Analytical Processing*) permettant d'agréger, de visualiser et d'explorer de manière interactive les données. Si nous reprenons l'exemple précédent, nous pourrions alors analyser la quantité des pesticides ou d'azote à l'échelle de la parcelle ou alors à un niveau plus agrégé de la dimension spatiale comme le bassin versant. Les traitements OLAP servent à naviguer entre différentes granularités d'une ou de plusieurs dimensions, et ce de manière très efficace (*i.e.* la navigation est instantanée).

Les utilisateurs exploitent l'entrepôt de données en combinant les différentes dimensions et les différents niveaux de granularité des hiérarchies correspondantes. Pour sélectionner les données appropriées à l'échelle adéquate, les utilisateurs expriment et soumettent des requêtes à l'entrepôt de données.

D'autres travaux (*Palpanas, 2000*) décrivent le couplage de l'analyse multidimensionnelle avec des méthodes de fouille de données (*ex. pattern mining*), l'objectif étant de proposer des méthodes hybrides associant les capacités exploratoires et analytiques de l'OLAP et les capacités descriptives de la fouille de données. Par exemple, l'outil ADSS-OLAP (*Abdullah et Hussain, 2006*), couplant OLAP et fouille de données (*clustering*) a été développé pour analyser l'incidence de la cochenille sur les cultures de coton. Pour enrichir davantage l'analyse OLAP et permettre l'exploration de données géographiques, l'idée a émergé de coupler les deux technologies OLAP et SIG (Système d'informations géographiques). Ainsi, le nouveau concept de Spatial-OLAP (SOLAP) (*Bédard et al., 2007*) est introduit

pour pouvoir exploiter conjointement les outils OLAP (décision, graphiques, etc.) et les outils géographiques (représentation cartographique, agrégateurs géographiques, etc.).

Par exemple...

Chez Inria, l'équipe-projet **LACODAM** (Inria, Institut national des sciences appliquées de Rennes, Institut national supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage, Université Rennes 1) a modélisé et construit un entrepôt de données pour analyser/explore, dans l'espace et dans le temps, les effets des pratiques agricoles sur les émissions d'azote dans l'eau et dans l'air (Bouadi et al., 2017). Par ailleurs, l'équipe-projet étudie l'utilisation de l'apprentissage machine pour l'amélioration du bien-être animal (santé des vaches laitières et alimentation des truies).

À INRAE, l'unité **TSCF** consacre un de ses axes de recherche à l'OLAP spatial. Elle contribue entre autres à l'entreposage et l'analyse en ligne des données de biodiversité, notamment à travers le projet VGI4BIO (www.vgi4bio.fr) qui propose des méthodes d'analyse des indicateurs de biodiversité dans le contexte agricole centrés données et utilisateurs VGI.



Optidose® un outil pour adapter la dose en fonction des paramètres de la culture et du risque épidémique. © Le Mas Numérique.

3.4 Gestion et ingénierie des connaissances pour l'aide à la décision en agriculture

Les sections précédentes ont présenté l'état de l'art sur la donnée, que ce soit sa collecte, sa gestion ou son traitement ; nous avons également vu comment la modélisation permettait de gérer et représenter de façon mathématique des connaissances à partir des mesures et observations pour aider à l'interprétation et à la préconisation. Une autre facette importante de l'agriculture numérique est la gestion de connaissances, c'est-à-dire des informations de plus haut niveau, aussi bien des connaissances scientifiques générales (par exemple processus physiologiques des plantes ou des animaux) que des méthodes spécifiques à certains acteurs des filières agricoles (par exemple conduite de troupeau d'un éleveur, méthodologie de fabrication de certains fromages, etc.). Des efforts importants ont été engagés ces dernières années pour formaliser ces connaissances et les organiser dans des ontologies permettant d'y accéder de manière structurée. Les ontologies sont une des composantes des systèmes informatiques aidant l'utilisateur à accomplir une tâche. Cette aide peut prendre plusieurs formes, de l'automatisation d'une décision d'irrigation à la découverte d'une information pour l'aider à prendre une décision. Les connaissances peuvent également être produites par les analyses présentées plus haut. Dans ce cas la difficulté est de présenter ces analyses aux acteurs humains de la manière la plus intelligible qui soit. Là encore, les développements récents en analyse des données sont d'un intérêt particulier pour l'agriculture, que ce soit *via* des approches de visualisation ou *via* les méthodes d'interprétabilité des modèles d'apprentissage. Enfin, le but de tout ce qui est présenté dans cette section est de permettre aux acteurs humains de prendre de meilleures décisions. Des outils spécifiques, les OAD (Outils d'aide à la décision), utilisant tout ou partie des techniques présentées dans ce chapitre, sont disponibles pour ces acteurs et en constante évolution : cette section se conclura par un tour d'horizon de ces outils.

👁 Par exemple...

L'UMR **BIOEPAR** a contribué au développement de **EMULSION**, un logiciel et un OAD open source, basé sur l'intelligence artificielle. **EMULSION** permet aux modélisateurs de développer des modèles mécanistes stochastiques de systèmes complexes en épidémiologie, à différentes échelles et en utilisant différents paradigmes, tout en réduisant la quantité de code informatique à écrire (Picault et al., 2019). Sur cette base, le projet **ATOM** (*Automation of decision support Tools based On epidemiological Models*) vise à développer un processus d'industrialisation de la génération d'OAD à partir de modèles épidémiologiques mécanistes (<https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar/Recherche/Projets-en-cours/ATOM>).

Les systèmes à base de connaissances en agriculture

Des premiers systèmes experts aux systèmes à base de connaissances – Dans les années soixante-dix sont apparus les premiers systèmes experts, issus de la recherche en intelligence artificielle. Ces systèmes sont dédiés à la résolution d'un problème précis à partir des connaissances issues d'un ou plusieurs experts pour mimer leur raisonnement dans le but de les remplacer à terme. Dans l'approche dite symbolique, les connaissances expertes sont formalisées à l'aide d'un langage de représentation des connaissances basé sur le raisonnement logique. Cela s'opposait alors à l'approche connexionniste, qui mimait le fonctionnement du cerveau humain par des réseaux de neurones.

Une particularité du secteur agricole est que les problèmes inhérents à la gestion d'une culture ou d'un troupeau nécessitent des connaissances expertes de plusieurs domaines (sciences des sols, météorologie, chimie, biologie...). Pour pallier cette demande forte de plusieurs expertises, certains systèmes experts intègrent comme composants des modèles de simulation tels que ceux décrits au 3.2. Citons par exemple le système expert "*CrOp MAnagement EXpert*" (COMAX), dédié à la culture du coton, dont l'objectif est de maximiser les rendements en minimisant les intrants (McKinion et Lemmon, 1985) et qui encapsule un modèle de simulation de développement du coton (GOSSYM). L'acquisition des connaissances expertes étant cruciale pour le développement des systèmes experts, l'ingénierie des connaissances se concentrait alors sur les méthodes d'acquisition de ces connaissances. Ces méthodes permettaient de guider le cognicien dans les tâches

complexes d'identification, d'extraction et de formalisation des connaissances expertes issues de diverses sources (entretiens d'experts ou autres documents décrivant la tâche de résolution de problème).

Très prisés dans les années quatre-vingts, les systèmes experts ont été également sévèrement critiqués car non adaptables à une autre application que celle de départ, et difficilement évolutifs. Dans les années quatre-vingt-dix, les systèmes experts ont ainsi évolué vers des systèmes à base de connaissances. La notion d'ontologie apparaît alors dans le domaine informatique. Les ontologies ont pour vocation de formaliser des connaissances du domaine consensuelles et relativement stables, avec l'objectif qu'elles puissent être réutilisées dans d'autres systèmes à base de connaissances.

Un système à base de connaissances est composé de deux parties distinctes : d'une part, la base de connaissances, comprenant une ontologie structurant les connaissances du domaine, une base de faits qui instancie l'ontologie pour décrire des situations spécifiques, et éventuellement une base de règles qui enrichit l'ontologie ; d'autre part, un moteur de raisonnement qui est associé au langage de représentation des connaissances mais indépendant de toute base de connaissances particulière.

Évolution des méthodes d'acquisition et de capitalisation des connaissances –

L'évolution vers les systèmes à base de connaissances s'est accompagnée d'une évolution de la conception des rapports entre l'humain et la machine. Les systèmes à base de connaissances et le système informatique intelligent associé ont pour objectif de coopérer avec leur utilisateur pour l'aider à réaliser une tâche nécessitant diverses connaissances, en complétant ses connaissances, en lui révélant les conséquences de ses choix et en lui proposant d'autres options que celles qu'il aurait imaginées. L'ingénierie des connaissances a évolué alors vers une forme de médiation de la modélisation des connaissances, produisant des « modèles de connaissances », un modèle prenant ici un sens différent plus englobant qu'en 3.2 puisque représentant des connaissances et non plus des phénomènes. Ces modèles permettent au cognicien, en charge de l'implémentation dans un système informatique, de dialoguer avec des experts pour enrichir et valider les connaissances à représenter. Pour aider cette médiation, plusieurs méthodes ont été développées, la plus connue étant "*Knowledge acquisition and documentation structuring*" (KADS et son évolution commonKADS). Par exemple, un système préconisant des dates d'irrigation des manguiers a été développé à partir de la méthode commonKADS (Nada et al., 2014).

👁 Par exemple...

L'équipe-projet **GRAPHIK** (Inria, INRAE, CNRS et Université de Montpellier) étudie la représentation des connaissances. Elle travaille entre autres sur une méthode de collecte, de modélisation et de formalisation des connaissances visant à améliorer la qualité des fromages de terroir. La collecte est réalisée à l'aide de questionnaires; la modélisation se fait par la création de cartes mentales (*mind maps*) pour faciliter la validation par les experts et la formalisation est réalisée dans le langage des graphes conceptuels.

Les modèles de connaissances vont se déployer sur d'autres systèmes informatiques comme les systèmes de recherche (de sources) d'information. Cette évolution se traduit par la création de « mémoires des organisations ». La mémoire d'une organisation est l'ensemble des ressources humaines et matérielles, supports de connaissances, permettant à l'organisation de réaliser ces tâches. Une mémoire peut ainsi être composée d'un ensemble de documents textuels, de vidéos, de listes de compétences des employés et d'un ou plusieurs modèles de connaissances. La formalisation de ces modèles permet leur exploitation automatique, en vue d'aider à la circulation des ressources et des connaissances au sein des membres de l'organisation. Cette formalisation prend souvent la forme d'un *thesaurus* : une liste organisée de termes normalisés, organisés par trois types de relations (équivalence, hiérarchie, association), dans le but d'indexer et d'aider à la recherche de divers contenus.

 En savoir +

La FAO (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) a largement contribué à produire des mémoires d'organisation dans le domaine agricole (O'Leary, 2008). Sa base bibliographique AGRIS met à disposition différents types de ressources (documents scientifiques, jeux de données...) dans plusieurs langues. L'indexation de ces ressources est réalisée grâce au *thesaurus* AGROVOC, devenu le *thesaurus* multilingue incontournable dans le domaine agricole (Sini et al., 2008). Ce *thesaurus* assure une large couverture du domaine agricole et peut être adapté en fonction des besoins d'une nouvelle organisation. Un exemple de mémoire d'organisation est le projet Agropedia réalisé par plusieurs instituts agricoles indiens avec la FAO (Pappu et al., 2010), pour traduire les connaissances scientifiques issues des universités en des connaissances pragmatiques utiles pour les agriculteurs. Les modèles de connaissances utilisés dans Agropedia prennent la forme de cartes de thèmes (*Topic Maps*) agrégeant l'ensemble des connaissances nécessaires à une culture donnée.

Accès sémantique à des sources d'information – La naissance du Web sémantique au début des années 2000 a fortement impacté le domaine de la représentation des connaissances. Les technologies du Web sémantique sont un ensemble de langages, de protocoles et d'outils, standardisés sous l'égide du W3C, en vue de permettre l'exploitation automatisée des ressources du Web à partir de leur contenu. Les ressources du Web (des documents HTML par exemple, ou plus largement des données quelconques disponibles sur le Web) sont annotées avec des métadonnées décrivant le contenu de ces ressources dans un langage formel, constituant une base de faits qui peut être enrichie d'un *thesaurus* ou d'une ontologie qui précise sa sémantique.

Définition

Les principaux langages formels du Web sémantique sont les suivants :

- *Resource Description Framework (RDF)* : le langage de description des ressources du Web sous la forme d'un graphe constitué de triplets (sujet, prédicat, objet) ;
- *RDF Schema (RDFS)* : une extension de RDF permettant de définir un vocabulaire en termes de classes et propriétés (ou prédicats binaires) organisés par spécialisation ;
- *SPARQL Protocol and RDF Query Language (SPARQL)* : le langage d'interrogation de descriptions RDF(S) ;
- *Ontology Web Language (OWL)* : le langage privilégié de description des ontologies du Web Sémantique ;
- *Semantic Web Rules language (SWRL)* : un langage de règles qui permet d'enrichir des descriptions OWL ;
- *Simple Knowledge Organization System (SKOS)* : spécification en RDFS dédiée à la formalisation des terminologies, *thesaurus*, classifications et autres vocabulaires contrôlés utilisés dans les systèmes de recherche d'information.

Les ontologies du Web sont modulaires, centrées sur un besoin précis pour faciliter leur réutilisation et leur combinaison. Leur mise à disposition sur le Web améliore l'interopérabilité entre les systèmes à base de connaissances. Notons l'initiative du groupe de travail de la RDA Agri Semantic qui a étudié l'usage de ces technologies et ressources associées pour améliorer l'échange et le partage des données agricoles (Aubin et al., 2017). Ces technologies ont permis la transposition des mémoires d'organisation vers le Web.

👁 Par exemple...

INRAE développe des mémoires d'organisation concernant l'impact des changements climatiques sur les pratiques agricoles et l'agroécologie. Une archive des bulletins d'alertes agricoles français, les Bulletins de Santé du Végétal (BSV), a été constituée lors du projet VESPA qui a étudié les réseaux d'épidémiosurveillance (Roussey et al., 2017).

Le portail Web collaboratif GECO (<https://geco.ecophytopic.fr/>) a été développé pour améliorer le partage de connaissances autour de la protection intégrée des cultures et de l'agroécologie. Ce portail gère un ensemble de fiches textuelles explicatives pour proposer des moyens de lutte contre les bioagresseurs (Soulignac et al., 2017). GECO permet des recherches indépendantes du niveau d'expertise de l'utilisateur.

Les ontologies du Web et les thesaurus SKOS deviennent des ressources réutilisables. Pour retrouver l'ensemble de ces ressources, des portails spécifiques ont été développés.

👁 Par exemple...

À INRAE, l'axe informatique de l'UMR **MISTEA** a, entre autres, développé le portail AgroPortal (<http://agroportal.lirmm.fr/>) qui répertorie et met à disposition de façon ouverte les ontologies et thesaurus autour de l'agronomie et l'agriculture. AgroPortal fournit également des services d'aide à l'annotation de documents textuels et à la détection de liens entre les concepts de deux ontologies (problématique d'alignement d'ontologies). Il contribue également aux avancées du phénotypage haut débit des plantes.

Intégration sémantique de données structurées – Le Web de données liées (*Linked Data*), développé dans les années 2010, marque une nouvelle étape du partage de données basée sur les technologies du Web sémantique : on considère alors un réseau d'ensembles de ressources liés entre eux. Ce réseau repose sur l'utilisation de vocabulaires partagés (*thesaurus*, ontologies, etc.) pour décrire les données. Cette évolution va de pair avec la généralisation de la notion de donnée : on parle de données quelconques, notamment de données structurées issues de diverses bases de données.

👁 Par exemple...

Quelques exemples de données structurées :

Les données météo d'une station INRAE sont disponibles sur le Web de données (<http://meteo.clermont.cemagref.fr/>). Une ontologie centrale *Semantic Sensor Network* (SSN) fournit un patron (*design pattern*) de description des mesures.

Le projet européen SmartOpenData (<http://www.smartopendata.eu/>) a proposé une infrastructure (et un schéma de données *SmartOpenData* (smod)) pour gérer les données ouvertes et liées dans le domaine de la biodiversité et de l'environnement (par exemple en gestion des données d'agroforesterie).

Le projet *Agronomic Linked Data* (AgroLD – <http://www.agrold.org>) intègre dans une même base RDF 50 bases de données. Son objectif est d'interroger conjointement et de lier des points de vue différents sur les plantes cultivées (génomique, protéomique et phénotypique) et formalisés par au moins une des dix ontologies du Web utilisées (*Gene Ontology*, *Plant Trait Ontology*, etc.).

Des architectures hybrides intégrant des ontologies, un moteur d'inférence, et des bases de données de différents formats (relationnelle, NoSQL, RDF) telles que *OpenSilex* (<http://www.opensilex.org/>) sont utilisées pour développer plusieurs systèmes d'information sur le phénotypage haut débit. Dans cette architecture, tout objet scientifique (plant, pot, champ...) est identifié par un identifiant web (URI) et typé par un élément d'une des ontologies associées. La base RDF stocke les métadonnées descriptives statiques et la base NoSQL stocke les flux de données brutes : photos de drones, séries temporelles de capteurs en champs, etc.

👁 Par exemple...

Le système d'information GnpIS est en charge de stocker toutes les données structurées des expérimentations faites sur le phénotypage des plantes (Pommier et al., 2019). Les ontologies proposées par le réseau *Crop Ontology* (<https://www.croponontology.org/>) sont utilisées comme des dictionnaires de tous les traits observables dans les expérimentations.

Concernant l'animal, un réseau d'ontologies du Web développé à INRAE est utilisé pour rendre compatibles les descriptions des expérimentations animales effectuées dans différents centres de recherche. Ce réseau se compose actuellement de trois ontologies du Web (Salaun et al., 2018) : *Animal Trait Ontology for Livestock* (ATOL, sur les traits phénotypiques des animaux d'élevage), *Environnement Ontology for Livestock* (EOL, sur les paramètres environnementaux d'élevage), et AHOL (pour la santé animale du bétail).

Architectures émergentes – Au-delà du Web de données, la problématique de l'exploitation intelligente de données toujours plus volumineuses et hétérogènes suscite des recherches très actives qui combinent représentation des connaissances, gestion de données, Web sémantique, fouille de données et apprentissage, etc. C'est dans ce contexte qu'a été proposée une nouvelle architecture appelée *Ontology-Based Data Access* (OBDA) (Xiao et al., 2018) qui combine une approche particulière de l'intégration de données, dite par médiation, avec la notion de système à base de connaissances. Un système OBDA est structuré en trois niveaux : le niveau conceptuel, organisé autour d'une ontologie (décrite par exemple en RDFS ou OWL) ; le niveau des données, composé de diverses bases de données préexistantes et indépendantes entre elles ; et le niveau des "mappings" qui traduisent les données pertinentes pour l'application visée en une base de faits utilisant le vocabulaire de l'ontologie. Les requêtes au système (par exemple en SPARQL) utilisent ce vocabulaire, l'utilisateur s'exprimant au niveau conceptuel, sans connaissance du système de stockage des données (par exemple, une requête « *quels sont les auxiliaires permettant de lutter contre le bioagresseur X et les itinéraires techniques associés qui limiteraient la compétition avec la plante principale ?* » fait abstraction des schémas des bases de données sous-jacentes).

👁 Par exemple...

À INRAE, l'unité URFM Écologie des Forêts Méditerranéennes du département **ECODIV** mène des recherches pluridisciplinaires en écologie. En particulier, elle met en œuvre des systèmes OBDA matures tels que Ontop (<https://ontop-vkg.org/>) et MASTRO (<https://www.obdasystems.com/mastro>) pour une gestion durable des écosystèmes forestiers méditerranéens.

Dans le cadre de l'Internet des objets, certains de ces systèmes utilisent aussi les technologies Web sémantique (ontologie OWL, règles SWRL, base d'annotations RDF).

Les organismes de normalisation comme le W3C ou l'ETSI travaillent actuellement sur la validation de nouveaux standards et ontologies pour combiner l'Internet des objets et le Web sémantique : l'ontologie SAREF pour ETSI et l'ontologie "Web of Things" (WoT) pour le W3C. Ces ontologies n'ont pas encore atteint le niveau de maturité suffisant pour être utilisées dans des applications réelles.

👁 Par exemple...

À INRAE, l'unité **TSCF** propose une traduction de la méthode d'irrigation manuelle IRRINOV sous forme de règles SWRL et d'un réseau d'ontologies du Web pour représenter les connaissances permettant d'automatiser les arrosages.

Des questions demeurent sur la compatibilité des ontologies construites sur des principes différents : usages différents, auteurs différents, ontologies fondationnelles différentes etc. Certaines ontologies du Web proposent des schémas de données correspondant à des patrons réutilisables (*design patterns*) centrés sur un besoin précis. D'autres ontologies proposent des classifications de référence pour qualifier les données. Les gestionnaires de données doivent ainsi construire un réseau d'ontologies pour structurer leurs données, en vérifiant que ces ontologies restent compatibles entre elles. Sont-elles basées sur les mêmes patrons ? Permettent-elles de produire des inférences correctes ? Enfin, les questions de distribution du raisonnement sur tous les composants d'un système de type « Internet des objets » sont des problématiques de recherche actuelles.

Restitution des connaissances, visualisation, interactions homme-machine en agriculture

Les approches de production de connaissance à base de données (section 3.3) ont conduit à des résultats de plus en plus précis et fiables, mais aussi de plus en plus difficiles à comprendre, au point que l'on qualifie aujourd'hui la plupart de ces approches de « boîtes noires », avec l'impossibilité pour l'utilisateur de comprendre les déterminants du résultat produit (par exemple une décision de l'itinéraire technique). Une solution à ce problème est d'utiliser des approches d'interprétabilité locale comme *LIME* (Ribeiro et al., 2016) ou SHAP (Lundberg et Lee, 2017), qui visent non pas à expliquer le modèle appris dans sa globalité, trop complexe, mais les raisons qui ont conduit le modèle à produire cette décision dans le cas précis fourni par l'utilisateur, comme, par exemple, les attributs qui ont le plus contribué (positivement ou négativement) à la décision. Par exemple, SHAP, utilisé pour la détection d'œstrus vue plus haut (Fauvel et al., 2019), fournit des explications du type : « un œstrus a été prédit aujourd'hui en se basant sur l'évolution de la température des trois derniers jours et sur un temps de repos important il y a trois jours ».

En parallèle à la question de l'interprétabilité, la représentation visuelle de données et d'informations est un passage obligé pour tout système informatique lorsqu'il s'agit d'interagir avec des utilisateurs. « Visualiser » consiste à produire des éléments visuels (graphes, courbes, cartes, images) pour aider les utilisateurs à comprendre, explorer, analyser, donner du sens à des données, des modèles, des informations, parfois en grandes dimensions, souvent complexes (Kubicek et al., 2013). Une interface homme-machine, des visualisations fluides et efficaces, sont souvent essentiels dans le succès de systèmes numériques grand public. Le domaine de l'agriculture n'échappe pas à cette réalité.

L'exigence en matière de visualisation dans ce secteur est forte du fait de la conjonction de plusieurs facteurs : une croissance saisissante des masses de données collectées, des utilisateurs non informaticiens mais souvent technophiles, la nécessité d'une vision à différentes échelles spatiales et temporelles, sur des données privées et publiques. La visualisation est parfois même considérée comme une matière stratégique, car la maîtrise de ces techniques peut représenter un avantage compétitif, un pouvoir, pour certains acteurs de la chaîne agroalimentaire. Le domaine est d'ailleurs fortement investi par les acteurs privés (équipementiers), mais il existe des initiatives pilotées par des universités et des instituts, dont INRAE et Inria, sous licences libres (par exemple *AQUAPONY*³⁴, *GeoVisage*³⁵, *PARCHEMIN*³⁶) ou participatives (*I-EKbase*³⁷) (Wachowiak et al., 2017).

34. <http://www.atgc-montpellier.fr/aquapony/>

35. <http://geovisage.nipissingu.ca/>

36. <http://www.parchemins.bzh/index.php/outil-de-visualisation-donnees-lagriculture-littorale-bretagne/>

37. <http://iekbase.com/hot-spots-monitorin>

👁 Par exemple...

À INRAE, le groupe Écologie et Évolution des Zoonoses de l'UMR **CBGP** analyse la diversité virale des hantavirus et des processus évolutifs qui la façonnent. Ils ont entre autres piloté le développement de AQUAPONY, un visualiseur web qui permet de naviguer de manière interactive sur un arbre phylogénique et facilite l'interprétation objective des scénarios évolutifs.

Les outils actuellement déployés pour le monde agricole reposent sur des paradigmes classiques de visualisation : cartographie (GIS, Geographical Information Systems), interfaces de visualisation de données de capteurs, collections de visualisations liées (multifacettes) et outils réactifs (*dynamic queries*). Les interfaces sémantiques et les stratégies de visualisation liées (mise en relation de vues) sont des sujets très actifs, ainsi que les visualisations 3D, qui donnent une perception de la topologie des zones géographiques (jusqu'aux profils des champs), et l'usage de la synthèse d'images, voire de la réalité augmentée.

👁 Par exemple...

À INRAE, l'UMR **SAS** accompagne la transition agroécologique des systèmes et territoires d'élevage. En particulier, elle a participé au projet PARCHEMINS achevé en mars 2021 sur la visualisation de données d'agriculture littorale en Bretagne. Le projet PARCHEMINS a mis en place un visualiseur cartographique, outil web de consultation de cartes, qui permet à l'utilisateur d'interagir avec des données géographiques. À destination d'utilisateurs non géomaticiens ou non spécialistes des outils informatiques, il permet de représenter et d'analyser de l'information spatiale, de façon intuitive et simple d'utilisation.

L'interactivité et la rapidité de réponse des outils de visualisation sont un défi en agriculture (et ailleurs !), car ces visualisations doivent être adaptées à des terminaux légers (*smartphones*, tablettes) ou embarqués (tracteur connecté). La fluidité des visualisations de données est étroitement liée aux solutions techniques, aux protocoles d'échanges de données et à l'architecture des systèmes. La visualisation adaptative, sujet actuellement très actif en recherche, permet d'adapter la visualisation au contexte : profession de l'utilisateur, terminaux de visualisation, nature des données disponibles.

La question de la visualisation et du partage de la connaissance est peu abordée en pratique et reste ainsi pour l'instant plus dans le champ de la recherche que de l'application. Or en agriculture, l'expertise humaine joue un rôle traditionnellement très important, ce qui crée un contexte particulièrement favorable au développement de techniques interactives : il est en effet tentant de combiner les capacités expertes humaines avec des algorithmes d'apprentissage, d'optimisation ou de modélisation (Boukhelifa *et al.*, 2018). Suivant les stratégies et les systèmes, l'interaction homme-machine (IHM) peut être explicite (l'utilisateur est régulièrement interrogé *via* une interface, un système de visualisation) ou implicite (à l'insu de l'utilisateur ou en non-verbal, la machine captant des informations qu'elle utilise comme base d'apprentissage). Le courant actuel des recherches en visualisation et IHM se focalise préférentiellement sur des questions d'interprétabilité, d'explicitabilité, de causalité et de transparence des interactions.

Le tandem IHM/visualisation intervient aussi dans un cadre où l'expertise humaine est essentielle pour gérer l'incertitude des données et la prise de décision sur des questions multicritères : les approches qualitatives sont complémentaires des approches automatiques/statistiques (choix des critères, par exemple), pour gérer les ambiguïtés, les trous de connaissances, les extrapolations à d'autres types de cultures. Des exemples peuvent être trouvés dans l'agroécozonage – fondé sur des techniques de clusterisation, de segmentation – ou la Web-application *Crop-GIS* couplant modélisation et visualisation pour la gestion de la culture du maïs³⁸. Mais l'évaluation des systèmes interactifs est délicate car si l'algorithme apprend et s'adapte à l'humain, l'inverse est vrai aussi : l'utilisateur apprend à utiliser un système. Comprendre ces mécanismes subtils de coadaptation et de coévolution nécessite d'employer des approches de type science expérimentale (plans de tests, fiabilité des résultats, biais), de tester sur des cohortes de volontaires.

En conclusion, la visualisation et les IHM appliquées à l'agriculture sont des sujets relativement rares à la fois dans la littérature scientifique agronomique et dans celle sur la visualisation. Or c'est un facteur essentiel à l'adoption des technologies, les agriculteurs préférant des outils simples d'usage et moins précis à des outils très performants difficiles à utiliser (Pierpaoli *et al.*, 2013).

Outils d'aide à la décision (OAD)

À partir des années quatre-vingts, les programmes informatiques et l'électronique ont commencé à être utilisés pour améliorer l'efficacité de l'agriculture et mieux raisonner les activités agricoles. C'est l'émergence des premiers OAD numériques (Outils d'aide à la décision, en anglais DSS *Decision support system*).

38. <https://www.cropgis.com/>

Cette nouvelle révolution est plutôt bien perçue par les agriculteurs (79 % des agriculteurs qui utilisent les nouvelles technologies reconnaissent leur utilité, source *Rapport agriculture et innovation 2025*³⁹) et aussi par la société qui attend des innovations numériques un moyen pour préserver l'environnement (47 % des personnes interrogées sondage *Etude Opinion Way 2016*). Les OAD numériques sont basés sur de la programmation informatique « simple » associée à un *corpus* de données de référence relativement restreint, ils s'installent sur un ordinateur personnel ou s'utilisent depuis une interface web qui permet d'accéder à l'application. Ils sont le plus souvent développés par les instituts de recherche ou les instituts techniques. Des logiciels comme *INRAtion*⁴⁰ ou *InraPorc*⁴¹ font partie de cette génération d'OAD. Ces logiciels conçus par l'INRA sont des références françaises en termes d'aide à la conception des rations alimentaires des ruminants et porcs d'élevage. Dans le domaine du végétal, de nombreux logiciels ont aussi été développés pour aider l'agriculteur à planifier et gérer la fertilisation des cultures, la lutte contre les ravageurs ou l'irrigation. Aujourd'hui, avec la déferlante du numérique, une nouvelle génération d'OAD a émergé, qui emploie des technologies numériques actuelles comme la télédétection, le GPS, l'Internet des objets, l'intelligence artificielle etc. Ces OAD sont conçus et produits par le secteur de l'AgriTech où sont présents les majors de l'agribusiness et de nombreuses startups (*Padhy et Satapathy, 2020*).

Définition

L'agritech est un terme générique désignant les technologies de l'agriculture. Les Agritech se divisent en quatre pôles majoritaires : 1/ le biocontrôle, 2/ le *big data* agricole, 3/ la robotique et 4/ la génétique et les biotechnologies végétales. Ces quatre éléments sont souvent très liés et de nombreuses technologies agricoles sont issues de ces pôles.

L'intégration des nouvelles technologies dans les OAD permet de démultiplier la gamme de services offerts par ces outils couramment utilisés par les agriculteurs qui cherchent à prendre les décisions les plus adéquates pour gérer leur ferme (*Spanaki et al., 2021*). Connaître de manière précise l'état des parcelles agricoles ou des troupeaux est essentiel pour l'exploitant qui peut maintenant s'appuyer sur des données (images, mesures biophysiques...) issues de capteurs connectés pour avoir plus d'informations que ce que son œil ne peut lui permettre de collecter. Après différents traitements numériques, ces informations sont mises

39. <https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf>

40. <https://www.inration-ruminal.fr/>

41. <https://inraporc.inra.fr/inraporc/>

à disposition de l'agriculteur *via* une application dédiée accessible par le Web ou sur smartphone. Dans le secteur animal, les éleveurs n'hésitent pas à adopter ces nouveaux outils basés sur le numérique quand ils sont susceptibles de leur apporter un gain technique, économique et qu'ils peuvent diminuer la pénibilité de leur travail. Il y a tout d'abord les OAD basés sur des capteurs portés par les animaux (en externe ou interne), qui mesurent en temps réel les caractéristiques physiologiques de l'animal et son activité (température, capteurs de pression abdominale, mouvement ...). En élevage laitier, l'éleveur pourra ainsi s'appuyer sur ces outils pour piloter le cycle de reproduction de l'animal et détecter de manière fiable les chaleurs, les mises bas, ou des problèmes de santé, ceci avant même que des signes extérieurs ne soient visibles par un professionnel. On voit aussi émerger des prototypes d'OAD basés sur la reconnaissance d'images (issues de caméras installées en élevage) à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle (*deep learning*), permettant le suivi des animaux en termes de comportement et de santé, voire la reconnaissance faciale. Si une anomalie est constatée sur un groupe ou animal, une alerte peut être envoyée sur le *smartphone* de l'agriculteur. Même si nombre d'initiatives sont en cours, différentes questions, déterminantes pour qu'un OAD soit utilisé et utilisable par les professionnels, font l'objet de recherches, de plus en plus en interaction avec ces professionnels. Cela concerne notamment la précision, la pertinence (un OAD fournissant trop de fausses alertes par exemple risque d'être abandonné), l'adéquation et la forme des informations fournies à l'agriculteur selon son expertise et ses besoins, ainsi que l'ergonomie de l'outil, en lien avec les notions vues dans la partie visualisation et IHM (Li et al., 2020). La manière dont les connaissances de l'utilisateur seront utilisées fait l'objet de questionnements éthiques liés plus largement à l'innovation ouverte.

3.5 Automatisation, contrôle et robotique

Comme mis en évidence précédemment l'agriculture numérique est loin de se limiter à l'acquisition et au traitement des données. En effet, elle a vocation à exploiter ces données pour prendre des décisions et déterminer les actions à mener, tant au niveau spatial que temporel, afin d'optimiser les itinéraires culturels capables de concilier de hauts niveaux de production, la qualité des récoltes et la préservation de l'environnement. En ce sens l'aboutissement de telles préconisations requiert un travail précis et potentiellement fréquent, qui n'est pas toujours compatible avec les ressources et capacités humaines. Ceci est d'autant plus vrai que les tâches agricoles s'avèrent bien souvent fastidieuses, et parfois dangereuses. L'exploitation du potentiel complet des principes de l'agriculture numérique peut donc mener à une automatisation des tâches. Aujourd'hui, les technologies robotiques prolongent les développements d'ores et déjà mis en œuvre dans le cadre d'outils automatisés, ou de systèmes d'aide à la conduite

d'engins agricoles. Mais au-delà de l'automatisation de certains travaux, les progrès de la robotique dans le monde agricole doivent ouvrir la voie à une évolution des pratiques pour accompagner la transition écologique.

Farmstar fait partie des OAD basés sur des images spatiales à résolution infraparcellaire. Il a été développé par Airbus en collaboration avec les instituts techniques agricoles. La chaîne de traitement est ici complexe puisqu'elle mêle l'utilisation d'images spatiales avec d'autres sources de données comme les données climatiques et qu'elle mobilise la simulation informatique de modèles agronomiques. Le résultat est mis à disposition via des API (Application Programming Interface) qui sont interrogées par l'application utilisateur. L'agriculteur accède ainsi aux informations utiles sous forme de cartes et d'indicateurs « tableau de bord » via une application web intégrée qui masque l'architecture informatique complexe et les flux de données mobilisés.



Figure 1 : Farmstar, de l'image spatiale haute résolution aux cartes de conseils

👁 Par exemple...

L'équipe-projet **VALSE** (Inria, Ecole Centrale de Lille, Université de Lille) étudie les problèmes issus de l'analyse de systèmes dynamiques distribués, incertains et interconnectés. Elle vise la conception d'algorithmes d'estimation et de contrôle dans divers domaines. En particulier, dans le domaine de l'ostréiculture, ces algorithmes ont permis la conception d'un biocapteur basé sur les mesures et l'interprétation du comportement des mollusques bivalves, pour la détection à distance de la pollution des eaux côtières et des conséquences du changement climatique.

Les milieux structurés, alliés des robots

L'essor de la robotique s'est historiquement ancré dans les domaines d'application de l'industrie, notamment automobile, pour l'automatisation des chaînes de production (*Bahrin et al.*, 2016). Il est alors possible de concevoir des infrastructures permettant aux robots de se référencer et d'évoluer dans des environnements parfaitement connus et inchangés, ainsi que de maîtriser les conditions d'interactions (conditions de lumière, manipulation d'objets connus, création de zones spécifiques). Ceci aide grandement la conception d'algorithmes de perceptions et commandes robustes, basés sur des modèles d'évolution des robots qui nécessitent des hypothèses fortes (roulement sans glissement, reconnaissance d'objet ou de scène, localisation précise, etc.). Par conséquent, les applications de la robotique en agriculture se sont en premier lieu focalisées à l'intérieur des bâtiments, notamment pour la production animale (*Bergerman et al.*, 2016). En ce sens, le plus gros marché de la robotique dans le domaine de l'agriculture se situe aujourd'hui dans l'élevage, avec les robots d'affouragement ou de traite. Ceux-ci peuvent en effet exploiter un certain nombre de repères, et bénéficier d'aménagements particuliers pour conserver un haut niveau de répétabilité. Ils sont ainsi à même de remplir des missions astreignantes (comme la traite ou le nourrissage des animaux) et libérer du temps à l'agriculteur. De telles évolutions accompagnent de plus en plus les pratiques, puisqu'aujourd'hui la moitié des nouvelles installations françaises en élevage laitier s'équipent de robot de traite (*Tse et al.*, 2018).

Dans le cadre de la production végétale, il est plus difficile de mettre en place de telles infrastructures, et la structuration apportée par les cultures est par essence changeante, posant des problèmes de détection et de référencement. Néanmoins, l'automatisation de certaines tâches, et en particulier la conduite d'engins agricoles, a grandement bénéficié de l'avènement du GPS, notamment dans sa version centimétrique, constituant de fait une référence absolue. Ainsi de nombreux dispositifs visant à automatiser le pilotage, sous la surveillance d'un « conducteur », ont vu le jour, partageant un certain nombre de problématiques avec les avancées sur le véhicule autonome.

L'exploitation du seul capteur GPS demeure toutefois limitée pour la réalisation de robots entièrement autonomes (i.e. sans surveillance humaine embarquée), pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les pertes possibles des signaux satellitaires aux abords des bâtiments, sous serres, ou à proximité de végétation haute, impliquent une reprise en main. Ensuite, l'accomplissement de travaux agricoles exige un référencement et une interaction avec la végétation et non avec une référence absolue, même si les plantations sont réalisées avec un référencement GPS. Enfin

l'absence d'un superviseur embarqué impose de doter une machine autonome de moyens de perception pour garantir la sécurité (éviter d'obstacles, gestion de la traversabilité).



Étude d'un tracteur électrique robotisé pour l'agroécologie. © INRAE

Ainsi, plusieurs autres stratégies – vision (Stefas *et al.*, 2019), laser (Tourrette *et al.*, 2017) – viennent en substitution ou complément d'un référencement absolu pour réaliser la fonction de navigation autonome. Celle-ci est d'ores et déjà exploitée commercialement dans des robots, principalement pour le désherbage mécanique, la tonte, la surveillance. L'efficacité de ces robots demeure néanmoins limitée pour le moment en termes de tâches et les performances sont intimement corrélées aux conditions de détectabilité.

Pour envisager des travaux plus complexes (taille, récolte en plein champ), de façon complètement autonome, il convient de pouvoir lever plusieurs verrous scientifiques et technologiques pour pouvoir appréhender la variabilité des milieux d'évolution, ainsi que la diversité et la complexité des tâches à effectuer, en conservant l'intégrité du robot ou des robots.

De l'adaptation à la reconfiguration

Contrairement à la robotique mobile en milieux industriels ou routiers, les robots mobiles évoluant en milieux naturels requièrent des capacités d'adaptation pour affronter la diversité des conditions d'interaction et leur variabilité (Bergerman et al., 2016). Ceci suppose la modification en ligne des paramètres de perception et de commande (comme la modification des temps de réponse en fonction de la vitesse (Hill et al., 2020) ou l'adaptation de seuil de détection en fonction des conditions de luminosité. Plusieurs mécanismes d'adaptation et d'anticipation ou de commande robuste ont été proposés pour affronter la variation de ces milieux et conserver un haut niveau de précision, tout en maintenant l'intégrité du robot (Krid et al., 2017 ; Yandun et al., 2017). Cette dernière fonctionnalité se définit de façon relativement binaire dans les milieux structurés : éviter les collisions avec un obstacle géométrique, ne pas évoluer dans une zone interdite. En milieux naturels, la notion d'obstacle est plus floue, et sa résolution plus complexe. D'abord, la rencontre avec un obstacle n'est pas nécessairement un cas d'échec, car les robots ne doivent pas être arrêtés lorsqu'ils enjambent la végétation ou doivent pousser une branche. Ensuite, certaines zones peuvent être franchies à certaines conditions (limitation de la vitesse ou du chargement), et le franchissement dépend aussi des conditions de sol (notamment l'adhérence) et des propriétés du robot (Guastella, 2018). Enfin, l'évolution dans certaines zones peut mener à une perte de contrôle ou de stabilité physique du robot (Wolf et al., 2019).

Par exemple...

À INRAE, l'UR **TSCF** conçoit des systèmes reconfigurables et à autonomie partagée, pour accroître les performances et la sécurité des engins œuvrant en milieux naturels, en particulier ceux rencontrés dans l'agriculture. Elle conçoit par exemple des mécanismes d'adaptation pour affronter la diversité des conditions d'interaction et leur variabilité.

Plusieurs approches permettent de prendre en compte cette complexité par la notion de traversabilité (ensemble des conditions permettant le passage d'une zone définie devant le robot). Néanmoins, le travail autour de cette notion illustre la difficulté à définir une approche unique de perception et de commande pour réaliser des tâches agricoles complexes par un robot. Aussi, de nombreux travaux sont focalisés sur la sélection en temps réel ou la fusion de comportements types

(voir le projet INRAE *Adap2E*⁴²), ce qui pose le problème de l'interprétation de scène et de l'évaluation des comportements. En outre, de nombreuses stratégies en robotique agricole sont centrées sur la coopération de robots plus basiques, capables de s'associer ou de travailler sur une même zone. Ceci permet de limiter les risques sur le fonctionnement de chaque robot (énergie cinétique limitée en cas de choc) et le coût de chaque robot, mais reporte la complexité sur l'association et la synchronisation de la flotte (*Blender et al.*, 2016).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes recherches menées pour l'utilisation du numérique en agriculture. Elles sont principalement centrées autour de la donnée, à tous les niveaux du cycle de la donnée, de sa captation à son exploitation en passant par sa collecte, sa traçabilité, son traitement, son stockage, son interprétation, sa restitution ou son usage dans des systèmes automatisés ou robotisés. Différentes compétences sont mises en œuvre pour y apporter des solutions efficaces, sûres et sécurisées incluant le réseau, la modélisation, l'apprentissage, la gestion des connaissances, le contrôle. Les buts sont, entre autres, d'assister les agriculteurs dans des tâches difficiles, de permettre une meilleure gestion de nos ressources, de favoriser les échanges et savoir-faire, le tout dans le respect autant que possible de l'environnement.

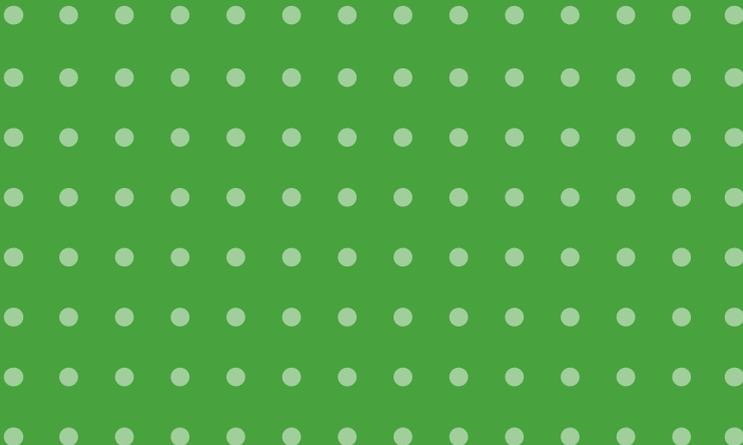
42. <https://adap2e.inrae.fr/>



Numérique et agroécologie : des opportunités à explorer, des défis à relever

Auteurs – *Véronique Bellon-Maurel, Pascal Bonnet, Isabelle Piot-Lepetit,
Ludovic Brossard, Pierre Labarthe, Pierre Maurel, Jean-Yves Courtonne.*

Remerciements (contribution, relecture, édition) – *Frédéric Garcia,
Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*



Le numérique aura un impact fort sur l'agriculture. Sera-t-il positif ou négatif ? Certains, comme *Rotz et al.* (2019), s'inquiètent du fait que ces technologies provoqueront une plus grande intégration des marchés et une concentration des entreprises, d'autres, comme *Bonny* (2017), réfutent cette opposition, sous réserve de changements dans la gouvernance et d'une bonne communication avec le grand public. En parallèle, plusieurs auteurs soulignent qu'agroécologie et numérique peuvent converger (*Bellon Maurel et Huyghe*, 2016 ; *Biradar et al.*, 2019 ; *Caquet et al.*, 2020 ; *Grieve et al.*, 2019 ; *Klerkx et Rose*, 2020 ; *Wegener et al.*, 2017). L'agroécologie désigne tout à la fois une discipline scientifique, un mouvement ou encore un modèle agricole s'appuyant sur un ensemble de pratiques alternatives, dont l'objectif est de construire des systèmes alimentaires viables respectueux des Hommes et de leur environnement. Comme rappelé par *Altieri* (1989), elle mobilise des aspects techniques et des aspects socioéconomiques sur toute la chaîne de production (ce qui est produit, comment c'est produit et pour qui c'est produit). Les techniques de production agroécologiques cherchent à améliorer les systèmes agricoles en utilisant les processus écologiques, en particulier les synergies biologiques entre les composantes de l'agroécosystème et l'équilibrage des « entrées et sorties » du système, aussi appelé « bouclage des cycles ».

Ce chapitre sera consacré à étudier les opportunités et les défis que présente le numérique pour l'agroécologie dans son acception la plus large, c'est-à-dire celle de systèmes alimentaires durables. En tant que « technologie habilitante », le numérique peut en effet accroître les capacités de réponse à quatre enjeux qui touchent les agriculteurs :

- mieux produire, en cohérence avec les principes de l'agroécologie, en créant des connaissances pour accompagner la transition agroécologique et en s'adaptant aux changements exogènes, en premier lieu le changement climatique ;
- mieux produire en assistant l'agriculteur dans la conduite de l'exploitation ;
- mieux s'inscrire dans l'écosystème de l'agriculture, *i.e.*, dans les chaînes de valeur et les écosystèmes territoriaux ;
- mieux partager, apprendre et comprendre en accompagnant la transition agroécologique : partage de données, d'informations, de connaissances.

Les spécificités des pays du Sud seront également abordées.

4.1 Mieux produire : créer des connaissances pour accompagner la transition vers l'agroécologie

Les connaissances scientifiques et techniques pour accompagner la transition vers de nouveaux systèmes de production (agroécologie avec ses déclinaisons comme l'agriculture biologique, la protection intégrée ou l'agroforesterie) sont encore en construction. Or, pour diffuser largement ces modèles agroécologiques et permettre leur changement d'échelle, il est urgent d'en comprendre les mécanismes (Altieri et al., 2012) et de construire des références (Vanloqueren et Baret, 2009). En agroécologie, tous les niveaux de diversité et de régulations biologiques – intraspécifique, interspécifique ou fonctionnelle (couplage végétal-animal, écologie des paysages) – peuvent être mis en œuvre pour rendre les systèmes résilients (Caquet et al., 2020). Le revers est la profusion des possibles – choix variétaux, assemblages d'espèces, couplages entre culture et élevage – qui rend a priori impossible l'ambition de créer une connaissance sur l'ensemble du champ des possibles. Face à ce défi, les modes de construction de la connaissance doivent être renouvelés et le numérique permet de construire ces connaissances essentielles à la transition agroécologique (Leveau et al., 2019) avec trois leviers



Piège à insectes connecté. © Le mas numérique.

Représenter les systèmes complexes de l'agroécologie

La modélisation en agroécologie est en plein essor mais le sujet est complexe⁴³. La modélisation n'a de sens pour l'action que si elle intègre les interactions dans l'exploitation voire jusqu'à l'échelle du paysage (*Tixier et al.*, 2013). Sa mise en œuvre est délicate. *Antle et al.* (2017) identifient plusieurs points à aborder pour construire les modèles de nouvelle génération servant l'agroécologie : (i) l'amélioration des modèles existants, pour prendre en compte l'incertitude ou des événements extrêmes ; (ii) le passage des modèles de cultures aux systèmes de production ; (iii) la modélisation des cultures et des rotations complexes ; (iv) les modèles faisant le lien entre cultures et production animale ; (v) le changement d'échelle, du champ au paysage ; (vi) l'interopérabilité. Il faut aussi construire les modèles des briques élémentaires décrivant chaque compartiment du système. De plus, l'échelle des paysages fait naître des fronts de science sur une « meilleure compréhension de la dynamique de populations et sur le rôle des interfaces milieu cultivé / milieu naturel, peu documenté » (*Caquet et al.*, 2020). À l'échelle de l'exploitation agricole, plusieurs défis de modélisation se posent, l'exploitation agricole étant un système complexe piloté à la croisée des modélisations socio-écologiques et sociotechniques (*Bergez et Théron*, 2019).

Collecter des données en masse sur les nouveaux agroécosystèmes

L'absence de données et la difficulté d'y accéder sont un frein à l'amélioration et à l'usage des modèles. Or, l'agriculture est l'objet d'un extraordinaire accroissement de la quantité de données : en 2014, environ 190 000 données étaient produites par jour sur une ferme aux USA et en 2050 plus de 4 millions de données pourraient être produites par jour (*Rotz et al.*, 2019). Ces données proviennent par exemple des objets connectés (*Elijah et al.*, 2018), des capteurs à poste fixe (station météo, piège connecté, alarmes diverses...), embarqués sur des machines (capteurs de fonctionnement de la machine, mais aussi de caractérisation des cultures), portés par les animaux (capteurs d'activité, bolus pour enregistrer les températures, géolocalisation) ou les opérateurs humains (téléphones portables). La variété et le volume des données ayant trait à l'agriculture permettent aujourd'hui de qualifier

la situation de *big data* agricole (*Bellon-Maurel et al.*, 2018). Or les données sont incontournables pour créer des modèles sur les mécanismes complexes de l'agro-écologie, difficiles à modéliser par des approches déterministes. L'élaboration de tels modèles nécessite de mener des observations et quantifications systématiques dans les systèmes de production agricole, à plusieurs échelles (*Biradar et al.*, 2019). *Chowdhary et al.* (2019) évoquent d'ailleurs ce problème de manque de

43. Pas moins de 107 modèles ont été recensés à l'Inra en 2018 par *Caquet et al.* (2020).

références, le « *verrou du phénotypage* » qui handicape l'agroécologie et l'agroforesterie. C'est pourquoi le développement de connaissances dans ces domaines exigerait d'accroître les capacités de phénotypage haut débit dans des milieux variés, en déployant le phénotypage haut débit à la ferme (en champ ou dans le troupeau). Ceci questionne sur les dispositifs de phénotypage. Actuellement, le phénotypage est mené par la recherche et les sélectionneurs avec des dispositifs de mesure coûteux, tels des portiques ou autres plates-formes automatisées en champs⁴⁴. Plusieurs auteurs (Caquet et al., 2020 ; Grieve et al., 2019 ; Ingrand, 2018) préconisent de développer le phénotypage à large échelle ou l'échantillonnage continu des cultures, des animaux et des conditions d'environnement, ce qui nécessitera la mise au point de mesures peu coûteuses et simples à utiliser, en proxi-détection (capteurs portables) ou en télédétection – notamment grâce aux satellites *Sentinel 2* qui offrent dix mètres de résolution et trois à cinq jours de revisite (Biradar et al., 2019) – pour approcher des caractéristiques physiques et physiologiques des plantes et des animaux (Reynolds et al., 2019).

Modélisation à base de données, une étape vers une nouvelle connaissance

Les possibilités ouvertes par l'intelligence artificielle pour tirer des connaissances à partir des données en particulier du “*big data*” ou des “*smart data*” agricoles sont bien décrites (Pham et Stack, 2018 ; Wolfert et al., 2017), mais ne visent pas spécifiquement l'agroécologie. Les quelques auteurs qui ont étudié l'usage des réseaux de neurones en agroécologie (Jiménez et al., 2008 ; Schultz et al., 2000) soulignent plusieurs points d'attention : (i) la question de la validation des modèles obtenus et de l'incertitude ; (ii) le besoin de structurer le système en sous-systèmes plus simples auxquels les réseaux de neurones seront appliqués et (iii) l'importance de voir l'inférence, souvent résumée à une boîte noire, comme une étape vers un modèle plus analytique.

44. Voir par exemple *Field Scanalyzer* de Lemnatec, la *Phenomobile* ou le portique commercialisé par *Hiphen*, le *Fieldscan* de *PhenospeX*...

4.2 Mieux produire : le numérique pour assister l'agriculteur dans la conduite de l'exploitation

Selon Caquet et al. (2020), « la capacité du numérique et des agroéquipements à porter spécifiquement un modèle d'agriculture agroécologique reste un pari » et l'un des cinq « grands secteurs » à maîtriser concerne la « caractérisation de l'environnement, des plantes ou des animaux d'élevage, dans l'optique de mieux piloter, mieux analyser »⁴⁵. La question de l'aide à la décision se pose aussi et d'autant plus fortement que les conduites d'exploitation sont souvent multi-objectifs. Ainsi, le « passage à l'échelle » vers une agroécologie très transformante (reconception des systèmes) nécessite de se doter de nouveaux outils parmi lesquels le numérique pourrait avoir une place importante pour (i) mieux piloter, au niveau de l'itinéraire technique (principes de l'agriculture et de l'élevage de précision) ou au niveau stratégique de l'exploitation (en intégrant des données économiques) ; (ii) mieux opérer, avec des agroéquipements dédiés à des systèmes plus complexes demandant plus d'interventions.

Adapter les principes de l'agriculture de précision à l'agroécologie : observer et décider

Les principes de l'agriculture et de l'élevage de précision s'appliquent en agroécologie puisqu'ils préconisent des interventions adaptées aux besoins des plantes et des animaux. Ils se fondent sur un cycle de quatre étapes pour engager des actions au cours de l'itinéraire technique : observation (mesurer un « symptôme »), diagnostic (identifier l'état de la plante ou de l'animal), préconisation (définir l'action à mettre en place), action. L'agriculture de précision permet de cartographier les hétérogénéités dans les cultures et d'intervenir de manière différenciée dans les différentes zones de la parcelle agricole (Bellon et Huyghe, 2016) : fertilisation azotée (avec capteurs satellites depuis le début des années 2000 et technologies embarquées ou aéroportées depuis une dizaine d'années), irrigation de précision (Molden, 2007), s'appuyant sur une estimation du stress hydrique par « proxys » (température de surface des feuilles, estimation visuelle de caractéristiques physiologiques⁴⁶), protection des cultures qui est l'élément le plus complexe à aborder du fait de la diversité des problèmes phytosanitaires

45. Les autres sont : « le partage d'information entre acteurs des territoires », « les agroéquipements pour les besoins spécifiques de l'agroécologie », « la caractérisation de la réponse des organismes à des fins de phénotypage » et « les éléments de traçabilité des modes de conduite ».

46. Apex Vigne- <https://www.hdigitag.fr/fr/application-mobile-apex-vigne-facilite-le-suivi-de-la-croissance-de-la-vigne/>



Décollage d'un drone de cartographie au Sénégal. © CIRAD.

(mauvaises herbes, insectes et autres ravageurs, et maladies). L'élevage de précision implique de suivre en temps réel l'environnement (mesure d'ambiance dans les bâtiments ou en conditions extérieures) et les animaux avec, depuis une vingtaine d'années, des capteurs sur l'animal ou dans son environnement disponibles surtout pour les élevages laitiers : identification et géolocalisation par RFID ou GPS, imagerie (2D, 3D, infrarouge), accéléromètres, sons, automates de mesure (balances, compteurs à eau, à lait, distributeurs d'aliments) (Chastant-Maillard et Saint-Dizier, 2016). Les paramètres suivis sont divers : la croissance, la production de lait, l'ingestion alimentaire, le statut physiologique, le comportement, la reproduction, la santé et le bien-être (détection de boiteries, troubles digestifs, etc.)... (Benjamin et Yik, 2019 ; Fournel et al., 2017 ; Halachmi et al., 2019 ; Knight, 2020 ; Neethirajan, 2017 ; Rowe et al., 2019 ; Veissier et al., 2019 ; Xin et Liu, 2017). Aujourd'hui, ces techniques visent plutôt les élevages conventionnels mais des solutions se développent pour les systèmes alternatifs, par exemple avec des dispositifs de suivi des animaux et du pâturage (Shalloo et al., 2018) pour améliorer l'efficacité des systèmes extensifs basés sur l'herbe, plafonnée sinon par le manque de données, et garantir la conduite responsable de l'élevage auprès des consommateurs (Neethirajan, 2017).

Deux questions cruciales émergent pour la gestion des systèmes agro-écologiques :

(1) Concernant l'observation, c'est celle de la détection précoce des dysfonctionnements. En culture (*Divya et Santhi*, 2019 ; *Johannes et al.*, 2017) comme en élevage (*Ingrand*, 2018), c'est un point crucial du passage à l'échelle des agricultures alternatives (agroécologie, agriculture biologique, protection intégrée) qui ne disposent pas des mêmes panoplies curatives que l'agriculture conventionnelle. En champ, l'observation visuelle est très demandeuse en temps, dépendante de l'expérience et de la disponibilité de l'observateur (*Mul et al.*, 2016) et quelquefois impossible à mettre en œuvre si le problème est indétectable. Les technologies sont commercialisées ou encore au stade de la recherche : (i) dispositifs optiques pour les plantes et la détection des insectes volants (*Brydegaard et al.*, 2014 ; *Grieve et al.*, 2019), (ii) quantification des spores par analyse en temps réel des bioaérosols mais non satisfaisant aujourd'hui (*Sharma Ghimiri*, 2019), (iii) pièges à insectes connectés (*López et al.*, 2012), (iv) dispositifs de suivi des animaux (*Li et al.*, 2020 ; *Moura et al.*, 2008 ; *Tullo et al.*, 2018 ; *van Hirtum et Berckmans*, 2004), et plus récemment dispositifs dits « portables » car portés par les animaux (*Neethirajan*, 2017).

(2) Concernant l'aide à la décision, c'est celle de la construction des modèles pour fournir une information utilisable pour décider. *Lepeniotti et al.* (2020) listent trois types de traitement des données : (i) l'analyse descriptive qui répond aux questions « Quelle est la valeur de la grandeur recherchée ? Quel niveau par rapport à d'autres producteurs, d'autres années ? Que s'est-il passé ? » ; (ii) l'analyse prédictive, qui répond aux questions « Que va-t-il se passer ? » et « Pourquoi ? » et (iii) l'analyse prescriptive, qui répond à la question « Que recommande-t-on de faire ? ». Le degré de complexité de ces modèles est croissant, ainsi que les problèmes d'interprétabilité et d'incertitudes. Les verrous méthodologiques sont liés à la construction du modèle : choix des symptômes à intégrer, variabilité naturelle de l'expression des symptômes et, pour la préconisation, autres facteurs inhérents à la plante ou à l'animal, à l'environnement, au système de production ou d'élevage (prise en compte des autres individus de son groupe), au matériel d'intervention, et à la stratégie de l'agriculteur.

La décision multiobjectif dans la conduite de l'exploitation agroécologique

Prendre des décisions stratégiques de conduite de l'exploitation est particulier en agroécologie car l'objectif est généralement multivarié (optimiser les trois dimensions de la durabilité⁴⁷) et multitemporel (court et long termes). Ces acteurs attendent des systèmes d'aide à la décision spécifiques, qui intègrent la dimension

47. Ce sont les dimensions économique, environnementale et sociale.

holistique (Schnebelin et al., 2021) Des questions spéciales de modélisation se posent donc pour répondre aux challenges propres à l'agroécologie comme : (i) la détermination de l'optimum dans un système spatiotemporel multiéchelle ; (ii) l'intégration de la stratégie de l'agriculteur dans le modèle d'optimisation (Antle et al., 2017 ; Groot et al., 2010) ; (iii) la gestion de l'incertitude. L'utilisation de formalismes alternatifs de modélisation et de gestion du risque est aussi à explorer : il s'agit non plus de rechercher un compromis optimal mais de garder le système dans un espace de possibles « désirés ».

Coconstruire agroéquipements et agroécosystèmes novateurs

Les technologies peuvent jouer un rôle clé pour la mise en œuvre « à l'échelle » de l'agroécologie qui est techniquement plus complexe à gérer que la monoculture (Wegener et al., 2017). Les cultures en mélanges (pluriespèces, plurivariétés) ou en association pourraient être implantées à grande échelle par une grande précision d'intervention (du semis à la récolte) et la caractérisation voire le tri des produits en mélange issus de la récolte. En agroforesterie, les troncs sont un inconvénient pour la mobilité des machines classiques et un frein à leur adoption (Mattia et al., 2018), mais peu de propositions technologiques existent ; Chowdahry et al. (2019) suggèrent de développer de petits "soft robots" de faible coût, aux bras souples, travaillant en réseau. En production animale, des robots de traite transportables au pâturage pourraient permettre un retour plus généralisé à l'alimentation au pâturage (Cloet et al., 2017). Enfin, si on considère le bien-être de l'exploitant, ou plus largement des opérateurs, il s'agit de réduire les tâches dangereuses, fatigantes ou gourmandes en temps (Vasconez et al., 2019). Le maraîchage et l'arboriculture sont particulièrement concernés : robots désherbeurs commercialisés en maraîchage, robots désherbeurs *open source* et de faible coût pour le maraîchage en planche (Farmbot, LettuceThink), robots de récolte – aujourd'hui un point dur et coûteux en maraîchage et arboriculture – et en particulier robotique collaborative ou cobotique (Vasconez et al., 2019).

Ainsi, les robots pourraient répondre aux contraintes d'intervention dans les nouveaux systèmes de culture et d'élevage avec une productivité équivalente aux pratiques actuelles. Le travail collaboratif, soit entre petits robots travaillant en essaim, soit entre robot et humains (cobots), pourrait être une voie à explorer. Les verrous sont le coût économique des robots en lien avec leur plurifonctionnalité, l'organisation du travail collaboratif (entre robots ou avec l'Homme), la perception et la préhension, la sécurité (mobilité, interaction avec l'Homme). Le déploiement de ces technologies nécessite aussi de relever les défis posés par leurs impacts environnementaux (fabrication, usage, fin de vie) et les enjeux de résilience (réparabilité, adaptabilité et autonomie). La coconception participative

est une voie à explorer pour réussir l'innovation robotique pour l'agroécologie, en réduisant les tensions entre des approches fondées sur l'écologie et celles fondées sur l'apport des technologies (*di Salvo et al.*, 2014).

Au Danemark, l'ITU (*IT University of Copenhagen*) aborde cette tension en considérant les robots comme une partie de l'écosystème ("*robotics agroecology*"⁴⁸).

Enfin, l'écueil du clivage entre les grosses exploitations qui adoptent ces technologies et les petites exploitations non conventionnelles qui ne les adoptent pas ou avec retard (*Caquet et al.*, 2020) pourrait peut-être être évité par la combinaison des approches frugales et des approches *high tech*, à l'instar des travaux *high-low tech* (MIT⁴⁹ ; *Kadish et Dulic*, 2015) et des approches "*makers*" (*Anderson*, 2012).

4.3 Mieux s'inscrire dans l'écosystème de l'agriculture : chaînes de valeur, territoires

Au-delà des bénéfices potentiels pour la production agricole, le numérique pourrait renouveler la manière dont les agriculteurs, dans un contexte de transition agroécologique, interagissent avec l'écosystème de l'agriculture, au niveau de la filière (en amont, avec les services à l'agriculture ou aval avec la commercialisation) ou de la gestion territoriale.

Les services à l'agriculture renouvelés par le numérique

Le conseil – Les activités de conseil sont au cœur des systèmes d'innovation en agriculture (*Labarthe*, 2009). Elles favorisent les interactions entre les acteurs de ces systèmes : organisations collectives d'agriculteurs (coopératives notamment), organismes de recherche, ONG, acteurs publics, industries d'amont et d'aval, intermédiaires...

La question de l'effet de la digitalisation sur les services de conseil aux agriculteurs est aujourd'hui l'objet de nouvelles recherches (*Fielke et al.*, 2020) et des projets visent à développer des solutions numériques pour mieux équiper les conseillers agricoles, en s'appuyant sur des méthodes de codesign⁵⁰. La digitalisation impacte en effet fortement les activités des conseillers, à la fois au niveau *front office* (nouvelles interfaces et applications entre conseillers et agriculteurs) et au niveau *back office* (fabrication de nouveaux services *via* l'utilisation massive de données ou de modèles agronomiques). Mais la digitalisation s'accompagne

48. <https://real.itu.dk/projects/robotic-agroecology/>

49. <http://highlowtech.org/>

50. Voir par exemple les projets européens <https://www.h2020fairshare.eu/> ou <https://www.agrilink2020.eu/>

également de l'émergence de nouveaux acteurs (*startups*, firmes du secteur des technologies de l'information) qui peuvent transformer en profondeur l'offre de conseil technique et les dynamiques des systèmes d'innovation agricole (Fielke et al., 2019).

Parallèlement, le conseil agricole est l'objet de nombreuses politiques publiques européennes, nationales et régionales, dont l'objectif est de contribuer au développement durable de l'agriculture (Dhiab et al., 2020). L'enjeu est donc double : d'une part la digitalisation va transformer les modalités du conseil agricole, d'autre part le conseil doit accompagner la digitalisation de l'agriculture pour qu'elle s'inscrive dans un développement durable, en déverrouillant certaines contradictions sociales, économiques ou environnementales liées aux technologies numériques : inégalité d'accès à l'information, inadaptation des solutions numériques, perte d'autonomie, risque de rapports de forces ou de verrouillage (voir partie 5 : risques).

L'assurance – La protection financière est un facteur essentiel d'amélioration de la qualité de vie en agriculture, du fait de sa sensibilité aux intempéries. Les systèmes sont divers, soit sous forme de fonds (exemple : le fonds « calamités agricoles »), soit sous forme d'assurances plus ou moins privées. Ces différents systèmes correspondent à la compensation d'un dommage et le numérique peut aider à son identification. Les assurances sont soit « traditionnelles », basées sur une réclamation de perte (de récolte, de rendement), soit – plus récemment – « indicelles », qui indemnisent le client sur la base d'indices liés à ces pertes (De Leeuw et al., 2014) : indices de rendement régionalisé, indices climatiques, indices basés sur l'imagerie satellitaire (Vroege et al., 2019), indices composites (De Leeuw et al., 2014). Le numérique pourrait améliorer les services d'assurance indicelle grâce aux systèmes d'observation et aux modèles. Pour construire les indices, les informations – classiquement issues des autorités publiques (météo, rendement spatialisé) (De Leeuw et al., 2014 ; Rao, 2010) et de la télédétection (De Leeuw et al., 2014 ; Vroege et al., 2019) – doivent vérifier quatre principes, ce qui n'est pas trivial : être (i) dignes de confiance et vérifiables, (ii) fortement corrélées avec le dommage, (iii) continuellement accessibles et (iv) collectées sur un temps suffisamment long (Vrieling et al., 2014). Les modèles permettent d'estimer l'aléa en assurance traditionnelle et relient les données au dommage en assurance indicelle, *via* l'indice. L'imparfaite corrélation entre l'indice et le dommage est le « risque de base », que l'on cherche à réduire en créant des indices composites, par exemple combinant des données satellitaires, climatiques, voire d'usage des sols (De Leeuw et al., 2014 ; Rao, 2010 ; Vroege et al., 2019). Les dangers sont (i) de créer des indices complexes, non interprétables par les agriculteurs (Vroege et al., 2019), (ii) de mal intégrer les dynamiques météorologiques dues au changement climatique qui rendent encore plus complexe la relation entre

données météorologiques et rendements et (iii) de mal utiliser les données massives – multisources, multirésolutions et non stationnaires – dans les analyses statistiques paramétriques des modèles actuariels classiques (*Ghahari et al., 2019*).

Renouveler les chaînes de valeur avec une meilleure connexion aux marchés

Le numérique ouvre la possibilité de remodeler le système alimentaire et les chaînes de valeur. Dans les chaînes globalisées, il peut réduire les coûts commerciaux, garantir la conformité aux normes et faciliter les échanges internationaux et, dans les chaînes plus courtes, mettre en visibilité et assurer la transparence. Ainsi peut-il (re)donner du pouvoir aux acteurs aux deux extrémités de la chaîne de valeur : petits exploitants et consommateurs (*Jouanjean, 2019*).

Plate-formisation – Les plates-formes sont au cœur des nouveaux circuits économiques de vente de produits agricoles, alimentaires ou de services (*cofarming.info, hellotractor.com*) (*ANRT, 2018*). Ce sont des interfaces d'intermédiation ouvertes, entre fournisseurs et clients, leur apportant des synergies techniques et économiques (*Tirole, 2016*). Côté « usager », la gratuité et la simplicité d'utilisation accélèrent le processus d'adhésion d'un maximum d'utilisateurs, ce qui est la principale proposition de valeur pour inciter les fournisseurs à utiliser la plate-forme (*Leibovici, 2015*). Le e-commerce agro-alimentaire concerne des géants comme Walmart et Amazon mais est aussi présent à des échelles très locales avec un nouveau modèle de développement rural et agricole qui hybride les comportements modernes (basés sur la mondialisation, voire la globalisation) et postmodernes (fondés sur l'ancrage territorial) (*Rieutort, 2009*). De nombreuses collectivités territoriales cherchent à construire des plates-formes pour rapprocher l'offre de la demande et ainsi dynamiser l'agriculture et le territoire – permettant à des zones rurales isolées d'accéder à des segments de marché valorisés et de créer des relations stables avec les consommateurs des zones urbaines –, approvisionner les cantines scolaires et satisfaire les citoyens et ce dans les pays du Nord ou du Sud (*IPES-Food, 2016*). Via le numérique et les plates-formes, le marché mondial de la consommation « collaborative » devrait bondir de 15 à 335 milliards de dollars entre 2017 et 2030 (*Claquin et al., 2017*). Un tel développement nécessiterait une logistique adaptée, qui pourrait également s'appuyer sur le numérique (*Messmer, 2013*).

Le verrou qui entrave ces nouveaux circuits est double : visibilité de l'offre et logistique. Aujourd'hui, l'offre est éparpillée sur des plates-formes multiples, ce qui limite l'effet réseau (loi de Metcalfe) et donc l'attractivité de la plate-forme qui a alors du mal à trouver son modèle économique. De plus, le manque d'agilité

numérique et de logistique sont des freins énormes à l'entrée des agriculteurs dans les plates-formes. La restauration collective réclame un approvisionnement local de masse (Loi Égalim) : comment l'assurer et le sécuriser avec une offre désagrégée ? La recherche – en particulier en recherche opérationnelle – pourrait donc être convoquée pour planifier ces approvisionnements désagrégés, pour la gestion de bases de données distribuées (dans les diverses plates-formes) et pour concevoir une logistique adaptée à ces produits fragiles mais de faible valeur ajoutée.

Traçabilité et confiance – La traçabilité alimentaire humaine et animale est obligatoire entre les entreprises (*General Food Law* de l'UE en 2002) et optionnelle au sein des entreprises. Les suivis intra-entreprises se généralisent dans les usines avec l'automatisation et les systèmes d'information (*Fountas et al., 2015*) mais sont diversement adoptés dans les exploitations (*Galliano et Orozco, 2011*) : en France, les logiciels de suivi technico-économique sont utilisés en moyenne par 7 % des agriculteurs en structures collectives avec une grande variabilité (de 2 à 35 %) ⁵¹. C'est un marché en croissance (aux USA, il devrait doubler entre 2016 et 2023 avec une croissance de plus de 14 % par an ⁵²) car il y a un enjeu à automatiser la capture des données pour éviter les erreurs de saisie et diminuer la charge de travail : codes optiques (codes à barres, QR codes), électroniques tels que les RFID (*Luvisi, 2016*), reconnaissance vocale (*Bellon-Maurel et al., 2014*). L'enregistrement des pratiques va entraîner la massification des données privées qui peuvent être valorisées par une meilleure information des consommateurs sur les conditions de production, en réponse à leurs attentes (*Jouanjean, 2019*). C'est l'arrivée de « l'hypertransparence » (*Kos et Kloppenburg, 2019*) qui transforme la gouvernance de la chaîne de valeur, avec de nouveaux rôles pour les consommateurs, qui influencent les distributeurs ou les transformateurs, ou pour les petits exploitants mieux rémunérés par des acheteurs prêts à payer plus cher pour des « propriétés » recherchées, y compris un prix équitable pour les agriculteurs (*Jouanjean, 2019*). Ainsi, l'effet est double : aider les consommateurs à faire des choix éclairés et les producteurs à démontrer qu'ils adoptent des normes et pratiques améliorées (*Gardner et al., 2019 ; Kos et Kloppenburg, 2019*) par un étiquetage justifiant le consentement à payer (*Caquet et al., 2020*). De même, c'est un élément-clé des initiatives – essentiellement volontaires – de certification de la durabilité (*Mol et Oosterveer, 2015*) qui pourraient alimenter des systèmes participatifs de garantie par les pairs (SPG) – qui évitent de passer par des contrôles par des tiers payants (*Lemeilleur et Allaire, 2020*) – ou aider à réaliser l'affichage environnemental via des ACV (Analyses de Cycle de Vie) automatiquement (*Bellon-Maurel et al., 2014, 2015 ; Miah et al., 2018*).

51. <http://agrotic.org/observatoire/2017/11/06/usage-du-numerique-pour-la-gestion-technico-economique-des-exploitations-agricoles/>

52. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/farm-management-software-market-217016636.html>

Cette recherche de transparence peut s'appuyer sur des technologies confortant la confiance, question centrale (Jouanjean, 2019). Les technologies *blockchains* (chaînes de blocs) portent cette promesse. La *blockchain* est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, et fonctionnant sans organe central de contrôle⁵³ (système distribué sans autorité centrale). Elle crée une base de données avec l'historique de tous les échanges, partagée par ses différents utilisateurs, ce qui permet à chacun de vérifier la validité des données. Cependant, dans les chaînes d'approvisionnement, la mise en œuvre des *blockchains* n'est pas triviale. En effet, la *blockchain* garantit la validité des données transmises (origine, intégrité, temporalité), mais pas leur véracité, à savoir la cohérence entre les flux de données et les flux de produits. C'est un problème aujourd'hui traité par de la consolidation de données (construction d'indices de confiance sur les données) ou par des technologies (RFID⁵⁴, couplage RFID/vidéogrammétrie 3D/empreintes digitales, Gopalakrishnan et Behdad, 2019). Enfin, les produits alimentaires étant périssables, il y a un intérêt à les suivre dans la chaîne logistique, surtout si elle est longue, en enregistrant les données pendant le transport : identification rapide des responsabilités en cas de défaillance, réaffectation anticipée des produits en cas de dysfonctionnement, évitant du gaspillage alimentaire, détection de falsification de produits pendant le transport (Jouanjean, 2019).

53. <https://blockchainfrance.net/>

54. https://www.wwf.org.nz/what_we_do/marine/blockchain_tuna_project/

En savoir +

L'hypertransparence, en 2017, a-t-elle motivé le lancement de la marque « *C'est qui le patron ?* » (CQLP) ? CQLP a utilisé Internet pour coconcevoir avec les consommateurs une gamme de produits éthiques (rémunération des producteurs), en les interrogeant sur le cahier des charges technique et social des produits et leur consentement à payer les propriétés attendues. Autre exemple, l'application *Yuka* qui donne « des informations sur l'impact sur la santé » construites à partir de la base de données ouverte *Open Food Fact*⁵⁵ (670 000 produits référencés par les consommateurs, en avril 2020), fait évoluer les modes de consommation et va jusqu'à influencer les industriels quichangent la formulation des aliments mal notés⁵⁶.

Cependant, certains auteurs alertent sur les risques de cette hypertransparence : elle ne serait que partielle et orienterait nos priorités (*Gardner et al., 2019*), elle pourrait exclure les petits agriculteurs (*Jouanjan, 2019 ; Kos et Kloppenburg, 2019*), elle pourrait nécessiter l'intervention d'intermédiaires privés, renforçant l'asymétrie d'information. Enfin, son bénéfice pour les agriculteurs n'est pas assuré. Cela implique également que les consommateurs soient prêts à payer pour des attributs de produits garantis (qualité, origine, empreinte environnementale ou sociale).

55. <https://fr.openfoodfacts.org/>

56. <https://www.franceinter.fr/yuka-l-application-qui-force-intermarche-a-revoir-ses-recettes>

Gérer les ressources à l'échelle du territoire

La gouvernance territoriale peut être définie (Rey-Valette et al., 2011) comme « un processus dynamique de coordination entre des acteurs publics et privés aux identités multiples et aux ressources asymétriques autour d'enjeux territorialisés visant la construction collective d'objectifs et d'actions en mettant en œuvre des dispositifs multiples qui reposent sur ces apprentissages collectifs et participent des innovations institutionnelles et organisationnelles au sein des territoires ».

L'agriculture s'inscrit de plus en plus clairement dans les projets de territoire, du fait de son rôle dans l'aménagement de l'espace, mais aussi du fait de la reterritorialisation des filières qui est aujourd'hui encouragée comme facteur de la résilience des territoires (IPES-Food, 2016). La transition agroécologique renforce la place de l'agriculture dans ce dialogue territorial car l'écologie paysagère, point-clé de la réussite du projet agroécologique, suppose une approche collective du territoire. De plus, le bouclage des cycles (de l'azote et du carbone), recherché en agroécologie, peut se faire au-delà de la ferme, à l'échelle territoriale dans une approche de type « économie circulaire de la biomasse ». Plusieurs types d'opportunités s'ouvrent dans ce domaine grâce au numérique.

Sur les territoires, les nouvelles filières de bioéconomie et d'économie circulaire se mettent en place : les déchets agricoles deviennent des ressources (Klerkx et al., 2019) avec aujourd'hui des plates-formes spécialisées, places de marché des matières organiques (par exemple : Organix de Suez) ou d'échange de produits alimentaires à date limite courte (application *toogoodtogo*). La connaissance des flux de matières mobilisés par les filières à chaque étape (production, transformation, échanges, consommation, déchets) est de plus en plus cruciale pour (i) questionner l'usage des ressources naturelles et identifier d'éventuels problèmes de concurrence d'usages (par exemple pour les biocarburants de première génération *versus* les usages alimentaires, l'alimentation des animaux d'élevage *versus* l'alimentation humaine), (ii) appréhender les vulnérabilités amont/aval des filières (par exemple : dépendance aux importations), et enfin (iii) estimer des empreintes environnementales (par exemple empreintes carbone, énergétique, eau, pollutions chimiques, utilisation des sols, etc.) (Bioteau et al., 2013). Au-delà de ces aspects purement quantitatifs, mobilisant en particulier les sciences de l'environnement et du numérique, les sciences humaines et sociales sont indispensables pour comprendre le fonctionnement des réseaux d'acteurs qui sont concernés par ces flux, voire qui les pilotent. L'enjeu est double : réinscrire les filières agricoles à la fois dans les territoires (ancrage matériel et social) et dans les limites planétaires (dimension environnementale). Le déploiement de la bioéconomie aux échelons européen, nationaux et locaux demande en outre

une cohérence entre échelles et entre territoires dans la mise en place des plans d'actions ; or cette vision multiéchelle reste encore peu développée.

Au-delà de ces filières, le développement du numérique permet de revisiter et d'enrichir la boîte à outils de l'ingénierie de la gouvernance territoriale pour faciliter le dialogue au sein du monde agricole et avec les autres acteurs des territoires. Cette ingénierie renouvelée doit aider à la coordination, la participation et l'apprentissage des acteurs et à l'adoption de nouvelles pratiques basées sur le numérique. De manière plus globale, elle doit servir à la construction et au pilotage de projets de territoires afin que leurs modèles de développement accordent une place explicite et inclusive à l'agriculture.

Dans ces domaines, les outils se développent mais des recherches complémentaires sont nécessaires en sciences et technologies numériques pour (i) pallier le manque de données à des échelles territoriales et sur des systèmes mal connus, (ii) améliorer la représentation et la modélisation spatiale et temporelle de ces systèmes et la visualisation des sorties de modèles, (iii) faciliter la médiation entre acteurs, (iv) sécuriser les systèmes et circuits d'information.

4.4 Accompagner la transition : partage de données, d'informations, de connaissances

Il est indispensable d'accompagner exploitants et filières dans la transition agroécologique qui est une importante prise de risques. L'accompagnement doit s'adapter à l'approche agroécologique qui promeut « *l'apprentissage individuel et collectif, source d'innovation* » (Meynard, 2017) et s'appuyer sur : (i) la modélisation, à assortir d'indications sur l'incertitude pour aider à identifier les impasses, les risques, les capacités de résilience ; (ii) l'apprentissage collectif ; (iii) l'objectivation du risque et son accompagnement socioéconomique (Caquet et al., 2020). Ce chapitre décrit la réponse du numérique pour le partage et l'apprentissage.

Le numérique, un atout pour le partage des connaissances

Dans un contexte de déploiement des principes de l'agroécologie, il est urgent de pérenniser les savoirs traditionnels, souvent adaptés à un terroir (Altieri et al., 2012) : il s'agit de renforcer le capital humain par la formation et les méthodes participatives qui prennent en compte les besoins, les aspirations et la situation des petits exploitants (Calvet-Mir et al., 2018). D'une part, les plates-formes, avec différents niveaux de médiation, facilitent la collecte, les échanges et la diffusion

de savoirs : vidéos sur les pratiques agroécologiques réalisées par les médiateurs en relation avec les agriculteurs (*AccesAgriculture, DigitalGreen*⁵⁷, *Osea*, etc.) (Bentley et al., 2019), recueil de connaissances des agriculteurs (comme *CONNECT-e* qui a créé des communs numériques sur les variétés primitives pour éviter l'érosion de connaissances et le verrouillage par des sociétés commerciales) (Calvet-Mir et al., 2018), réseaux sociaux généralistes sans médiation (*YouTube*). Wyckhuys et al. (2018) insistent sur deux points pour la réussite des technologies numériques dans l'adoption de pratiques nouvelles : (i) garantir l'accès au numérique, en surmontant des obstacles techniques, psychologiques et d'organisation, et (ii) prendre comme point de départ les connaissances et les pratiques des agriculteurs avant de se lancer dans l'élaboration de formations basées sur le numérique. D'autre part, le numérique facilite la cocréation de connaissances, démarche appropriée à l'agroécologie qui « combine différents types de connaissances, traditionnelles, indigènes, connaissances des agriculteurs et connaissances scientifiques » (Milgroom et al., 2016). Selon Wyckhuys, et al. (2018), cet apprentissage social est bien approprié aux problèmes agricoles complexes car il crée un espace pour différents points de vue, reconnaissant la diversité et les connaissances locales. C'est pourquoi ces auteurs préconisent de s'appuyer sur des expériences participatives utilisant des dispositifs numériques (tablettes) : les *Digital Farmer Field Schools*.

Il reste cependant des verrous aux échanges entre pairs et à l'apprentissage individuel, qu'ils soient technologiques (quelles technologies pour capitaliser et pour favoriser les échanges ?) ou sociologiques (quels modes d'apprentissage promouvoir ?).

Approche participative et innovation ouverte

L'approche participative est le socle de l'innovation ouverte et des *living-labs*, dispositifs d'innovation ouverte, dans lesquels citoyens, habitants, usagers sont des acteurs clés des processus de recherche et d'innovation. En agriculture, les *living-labs* peuvent être adossés aux dispositifs de la recherche autour d'expérimentations de systèmes agroécologiques ou mis en place au sein de projets d'innovation territoriale. L'innovation ouverte est essentielle en agroécologie : élaboration des « chemins » (les conditions futures plausibles) et de scénarios de la transition (l'instanciation du modèle en fonction des chemins identifiés) (Antle et al., 2017), meilleure représentation des phénomènes aux différentes échelles (*process* biologiques, gestion de la ferme, optimisation) (Groot et al., 2012). Or, les outils numériques sont très utiles pour ces processus participatifs en contribuant à (i) stocker et enregistrer l'information issue des ateliers participatifs ; (ii) montrer et visualiser les données (visions actuelle, future, dynamique... du territoire) ; (iii)

57. Plus de 5 000 vidéos, en 50 langues, réalisées en 10 ans, avec l'aide de DigitalGreen (www.digitalgreen.org)

équiper les processus participatifs (outils de modélisation et de scénarisation, jeux sérieux...); (iv) partager et diffuser les connaissances; (v) créer de nouvelles connaissances, à partir de la diversité des connaissances, des délibérations et des couplages; (vi) créer des liens entre agriculteurs, entre agriculteurs et chercheurs, entre agriculteurs et société, etc. (Bergez et al., 2016; Enkel et al., 2020; Leveau et al., 2019). Certains outils, comme les objets-frontières, permettent de faciliter l'analyse des compromis et les représentations multicritères lors des ateliers participatifs (Duru et al., 2015). Les modèles d'accompagnement (Barreteau, 2003) en font partie. Pour pallier le problème de la compréhension du modèle par les porteurs d'enjeux et créer une meilleure interactivité (Bécu et al., 2008), ils sont mis en œuvre dans le cadre de jeux sérieux. C'est la « ludification » ou « gamification » (Seaborn et Fels, 2015). De plus, depuis cinq ou six ans, émergent des jeux sur des plates-formes numériques pour faciliter l'expression des points de vue ou des préférences et la coconstruction (Speelman et al., 2014), la sensibilisation des acteurs (Prada et al., 2014), l'apprentissage (projet GATES⁵⁸, Speelman et al., 2014), etc. Cette approche est aujourd'hui complétée par la réalité augmentée, qui pourrait aider les porteurs d'enjeux à visualiser les futurs paysages diversifiés, dès la conception des systèmes de cultures⁵⁹.

Sur le plan sociologique, les verrous à la mise en œuvre d'une approche participative sont de plusieurs ordres : motivation des agriculteurs pour s'engager dans ce chemin inconnu, capacité d'organisation collective du changement, capacité à collecter et représenter les savoirs tacites, capacité à ouvrir les sources d'informations pour accompagner le changement.

L'agriculteur, producteur de données

Si « l'agriculture multifonctionnelle » existe depuis toujours (Renting et al., 2008), une nouvelle fonction se dessine aussi grâce aux outils numériques de collecte de données : la production de données.

Un premier enjeu est que les agriculteurs deviennent des acteurs du capital numérique des territoires. Les informations sur des composantes de ce capital telles que la biodiversité ou la fertilité des sols, seront cruciales pour la documentation, l'évaluation et le paiement des services écosystémiques (PSE). Le coût de collecte de l'information est aujourd'hui tel que les PSE sont distribués de manière uniforme en fonction des moyens mis en œuvre (OCDE, 2011). Mieux caractériser

58. <https://www.gates-game.eu/en/project/overview>

Projet H2020 "Applying GAMing TEchnologies for training professionals in Smart Farming – GATES" (Grant Agreement number: 732358 – GATES – H2020-ICT-2016-1)

59. Voir thèse #DigitAg « Le numérique au service de l'agroécologie : La réalité augmentée pour accompagner la conception de systèmes agroforestiers » sur www.hdigitag.fr

l'environnement, identifier des grandeurs mesurables simples qui rendent compte de son fonctionnement, quantifier, sera nécessaire si l'on passe d'une logique d'obligation de moyens à une logique d'obligation de résultats (Caquet et al., 2020). Au-delà des PSE, les agriculteurs contribueront à créer des communs informationnels qui, pour Antle et al. (2017), ont une valeur de bien public pour l'investissement public et la prise de décision politique. Des initiatives existent déjà, sur des données de qualité des sols (Della Chiesa et al., 2019) ou de biodiversité⁶⁰. Van der Burg et al. (2019) ont bien identifié cette capacité de l'agriculture numérique à générer d'autres services du fait des données produites ; ils invitent la recherche en priorité à clarifier le rôle sociétal des exploitations agricoles, à ouvrir l'imagination des parties prenantes sur les autres objectifs possibles que l'agriculture intelligente pourrait servir, et à améliorer la réflexion sur leur valeur relative.

Un second enjeu est que les agriculteurs produisent des données avec – et pour – la recherche afin d'analyser et de comprendre les processus biologiques qui sous-tendent la réalisation des services écosystémiques dans les nouveaux systèmes agroécologiques. Caquet et al. (2020) prônent de nouvelles stratégies « qui combinent les expérimentations menées par la recherche et la mobilisation d'autres sources de données [...] », comme les expérimentations à la ferme (Cook et al., 2013). Plusieurs auteurs considèrent ce domaine comme une nouvelle voie de recherche en agronomie (Reckling et al., 2020) pour reconcevoir les systèmes de culture en comprenant les processus (Falconnier et al., 2016), mener des essais de variétés en conditions réelles (Schmidt et al., 2018) et faire la démonstration de nouveaux systèmes de production (Leclère et al., 2018). L'expérimentation à la ferme est facilitée par les systèmes automatiques de surveillance et de mesure (monitoring) (Piepho et al., 2011) et l'agriculture de précision (Adams et Cook, 1997 ; Panten et al., 2010) qui réduisent les incertitudes dues à l'échantillonnage et à la mesure manuelle.

Ces démarches de collecte de données à vocation de recherche ou de documentation environnementales par les agriculteurs se heurtent à de nombreux verrous scientifiques, techniques (par exemple, quelles variables mesurer ? Où ? À quelle fréquence ? En croisant avec quelles autres sources de données ? Quelles infrastructures pour le partage des données et des connaissances ?) et socio-économiques (motivation à partager les données, valeur des données, évolution du métier, gouvernance des données...).

60. <http://observatoire-agricole-biodiversite.fr/>

4.5 Les spécificités des pays du Sud

La plupart des organisations internationales (FAO, 2020) ou bailleurs du développement (*Banque Mondiale*, 2019) voient l'agriculture numérique comme une source de transformation majeure et d'amélioration du secteur agricole, des systèmes alimentaires et du commerce pour les pays des « Sud » (*Lixi et Dahan*, 2014). En Afrique, les raisons pour développer une agriculture numérique sont les suivantes :

- le numérique permet de diversifier l'économie des services et de créer des emplois dans un contexte favorable : de bonnes formations en informatique, une recherche appliquée en sciences des données et géomatique, et une population sensibilisée au téléphone mobile (en 2014, 72 % de la population⁶¹) ;
- de nombreuses catégories d'agriculture et de ménages agricoles peuvent être concernées ; en favorisant l'inclusion des femmes et des jeunes (*El Hassane et al.*, 2015), le numérique agricole limite l'exode rural ;
- l'Afrique est une terre d'avenir agricole : grande réserve foncière et potentiel d'un secteur agroalimentaire pourvoyeur d'emplois au sein de filières agricoles variées (*Pesche et al.*, 2016).

Le contexte particulier de l'agriculture africaine doit être détaillé :

- les systèmes de production sont beaucoup plus divers que dans les pays tempérés : diversité inter et intrapays, diversité des zones agroclimatiques d'où des agroécosystèmes très contrastés (tropicaux et méditerranéens, régions arides et humides), diversité de situations des territoires ruraux, des structures et des régimes fonciers, coexistence de structures socioéconomiques variées avec une forte prévalence de l'agriculture familiale de subsistance, en pluriactivité ou commerciale (75 % des terres arables du monde ; *Lowder et al.*, 2016) associée à une diversité de techniques et pratiques et des structures spécialisées en monoculture souvent destinées à l'export ;
- les systèmes de production sont aussi plus complexes : la forte prévalence des systèmes plurispécifiques intégrés et multifonctionnels tels que les systèmes agropastoraux (en zone sèche) ou agroforestiers (cacao, café en zone humide) génère des paysages et des organisations complexes, de multiples règles et institutions de gouvernance de ressources territoriales partagées (pâturages des systèmes pastoraux mobiles, forêts tropicales), dans un contexte où l'information territoriale manque cruellement ou, si disponible, est rarement mise en commun ;

61. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/IT.NET.USER.ZS?end=2016&start=1960&view=chart>

- les circuits de commercialisation sont très variés (filières courtes, locales plutôt vivrières, filières régionales et nationales pour approvisionner les villes et filières internationales, qui agrègent les produits de petits producteurs) et peuvent être fragiles (manque d'infrastructures, morcellement de l'offre, difficultés d'adaptation aux standards...);
- les systèmes alimentaires connaissent, comme au Nord, une forte évolution accélérée par l'entrée de nouveaux acteurs et investisseurs dans l'agrofourmiture, la production et la commercialisation agricole – créant une tension sur la coexistence des modèles d'agriculture –, et par les outils numériques avec les plates-formes du e-commerce et le renouvellement de l'aide à la décision et des systèmes d'information territorialisés (usage de la proxidtection par drone, systèmes d'information sur les marchés, logiciels de gestion intégrés – ERP – intégrateurs en filières); fait important, le numérique entraîne un renforcement de la participation des femmes et des jeunes;
- le manque d'organisation sur les données est patent : absence de métriques (données de mesures), de mutualisation et d'archivage des données recueillies, faiblesse de certains systèmes publics d'information – sur le foncier (titres de propriété, cadastres), les ressources (qualité des sols, eau disponible), les quantités d'intrants utilisés, les quantités produites, les origines (traçabilité);
- l'intermédiation, la communication et les modes ou niveaux d'interaction (échange d'information) entre acteurs du monde agricole sont complexifiés par les faibles niveaux de formation des usagers, l'illettrisme ou la multiplicité des dialectes, qui ouvrent au développement de solutions numérique *ad hoc* (conseil agricole *via* boîtes vocales en langue vernaculaire).

Nous ciblons ici les besoins des agricultures « intermédiaires », multifonctionnelles et pluriactives, majoritaires sur le continent africain, et de leur écosystème, à savoir les circuits logistiques et l'information territoriale, qui présentent de nombreux verrous. Il s'agira de développer un numérique pour, de manière prioritaire :

- privilégier le développement de « systèmes alimentaires localisés et territorialisés » s'appuyant sur des modèles de production alternatifs (agroécologie, recyclage des biomasses);
- participer à l'organisation du capital informationnel des territoires qui manquent cruellement de données, au service de tous (exploitations individuelles, organisations intermédiaires, institutions...);
- faciliter la communication avec les agriculteurs, dans un contexte de faible couverture réseau, d'accès inégal à l'énergie, d'illettrisme, de pluralité des langues et dialectes;
- améliorer l'approvisionnement dans les circuits de commercialisation.

Les verrous scientifiques et techniques à la ferme ou dans la chaîne logistique, sont globalement les mêmes que ceux que l'on trouve dans les pays du Nord : besoin de technologies pour anticiper les risques (détection précoce des dysfonctionnements, aide à la décision personnalisée), gestion collective des ressources rares comme l'eau ou la matière organique, accès aux marchés (information, logistique), mais elles sont exacerbées par les conditions particulières des pays du Sud : diversité des systèmes, solvabilité, niveau technique des agriculteurs, illettrisme, manque d'infrastructures de communication (réseau, *data centers*) et de distribution d'énergie. Au-delà des aspects techniques, des considérations politiques, sociales et économiques doivent aussi être explorées pour anticiper l'impact du numérique sur les entreprises, les ménages agricoles pluriactifs, les marchés, les filières locales et les chaînes de valeur internationales, les sociétés et territoires (*Tsan et al., 2019*), car le numérique au service des agricultures du Sud reste un sujet de fortes interrogations (*Bonnet et al., 2019 ; Deichmann et al., 2016 ; Pingali, 2012*). Les conditions de l'innovation et des transitions en numérique agricole devront être étudiées au niveau des institutions (quel contexte politique, sociotechnique et socioéconomique pour développer l'agriculture numérique et plus largement l'économie numérique ?) et des processus (quels processus d'innovation pour aboutir à des applicatifs ayant un impact avéré sur les agricultures familiales ?) avec des questions sur les modalités de la recherche en agriculture numérique et sur la forme des systèmes d'innovation à mettre en place.

Conclusion

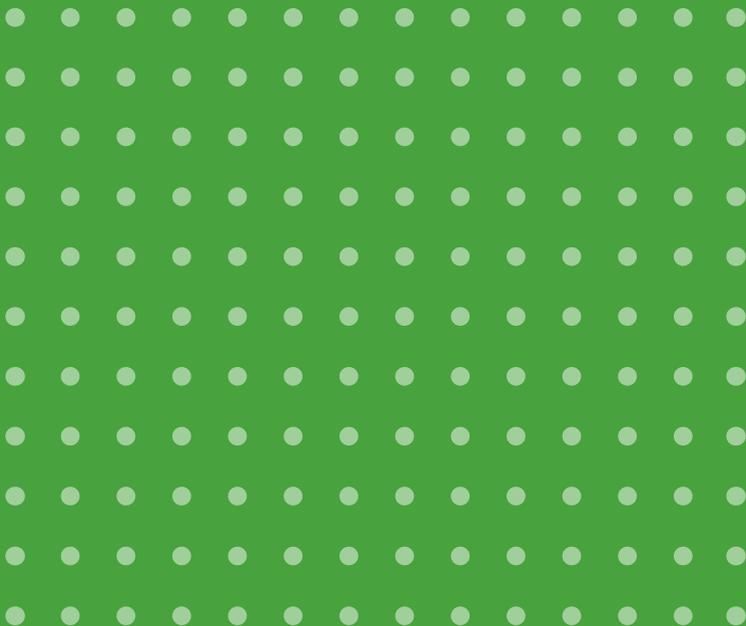
Ce chapitre a fait l'inventaire des domaines dans lesquels le numérique pourrait servir la mise à l'échelle et le développement d'une agriculture répondant aux principes de l'agroécologie au sens large dans la phase de production et d'insertion dans son environnement économique et social (chaînes de valeur, territoires). Cet inventaire de possibilités fait ressortir des besoins technologiques et méthodologiques en observation, en science des données, en modélisation, en extraction de connaissance, en stockage et échange de données, et dans les agroéquipements spécifiques pour assister l'intervention humaine, très sollicitée en agroécologie. Mais si les opportunités sont potentiellement nombreuses, il y a aussi des risques à développer le numérique en agriculture. Ceux-ci doivent être identifiés et analysés (Chapitre 5) pour mieux cadrer les recherches futures (Chapitre 6), afin de développer un numérique responsable, pour des systèmes alimentaires durables et compatibles avec les limites planétaires.



Risques

Auteurs – Frédéric Garcia, Pierre Labarthe, Emmanuel Prados,
Véronique Bellon-Maurel, Grégoire Chambaz.

Remerciements (contribution, relecture, édition) – Ludovic Brossard,
Nathalie Gandon, Aurélie Javelle, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.



Nous vivons dans un monde largement impacté par la révolution numérique en cours. Nous avons vu au chapitre 4 un ensemble de potentialités offertes par ces nouvelles technologies qui pourraient aider à développer une agriculture à la fois plus agroécologique, plus durable, et plus productive. Plus largement, le potentiel disruptif des technologies numériques semble sans limite et la révolution numérique pourrait apparaître ainsi comme une révolution de l'« encapacitation » (*empowerment* en anglais) où l'on voit s'accroître considérablement la capacité des acteurs à transformer efficacement tous les domaines de la société, tels que l'agriculture, mais aussi la santé, les transports, la culture, l'environnement, etc. Observer, prédire, anticiper, contrôler les processus naturels et sociaux à l'œuvre sur la planète pourraient sembler désormais relever du domaine du possible avec le numérique.

Le développement croissant des technologies numériques en agriculture soulève pourtant aujourd'hui de nombreuses interrogations quant à la tenue des promesses dont ce développement est porteur et sur la justesse et l'acceptabilité sociale des transformations qui l'accompagnent. Cette prise de conscience des risques inhérents à la révolution numérique n'est pas propre à l'agriculture. Les nombreuses analyses conduites autour des questions de démocratie, d'économie, d'environnement, de travail, de formation, d'information, etc. confirment l'ampleur des changements en cours et soulignent l'importance qu'il y a à ce que la société s'empare des enjeux du numérique, en intégrant le fait que les technologies ne sont pas neutres (*Stiegler, 2015 ; Boullier, 2019*).

En écho à ses nombreuses potentialités, le développement du numérique en agriculture nous semble s'accompagner de plusieurs risques : décevoir les attentes suscitées par la transition vers une agriculture et des systèmes alimentaires plus écologiques ; amplifier les impacts négatifs du numérique sur la société en termes de perte d'autonomie des acteurs et de renforcement des inégalités et des rapports de force ; mais aussi dériver vers une perte de souveraineté numérique et alimentaire du pays, et enfin accroître la vulnérabilité, diminuer les rendements et affaiblir la gouvernance du système alimentaire devenu trop complexe.

Évoquer ces risques, c'est permettre au citoyen, à l'agriculteur, au chercheur, de réfléchir à ses pratiques, ses choix, ses priorités afin de les guider et de construire un numérique responsable, qui les minimisera. Ce chapitre a vocation à les inventorier.

5.1 Compromettre la transition écologique de l'agriculture

Plusieurs raisons pourraient altérer la promesse du numérique de contribuer à la transition écologique. Pour certains, le numérique serait une technologie « verrouillante », qui a tendance à être déployée pour essayer de soigner des symptômes plutôt que pour corriger les causes des problèmes et dangers auxquels nous sommes confrontés, et dont la large diffusion serait une fuite en avant qui bloquerait toute possibilité de changements plus systémiques et radicaux. Le numérique en agriculture viendrait également distendre les derniers liens forts entre l'Homme et la nature. Enfin, le numérique a une empreinte écologique certaine, mais encore mal connue et peu prise en compte, ce qui pourrait remettre en question les véritables gains environnementaux qu'il apporterait.

Verrouiller la transition agroécologique

Le verrouillage technologique, ou sociotechnique, notion issue des théories de l'innovation (*David, 1985 ; Arthur, 1994*), fait référence à une situation où une innovation est bloquée car la forte cohérence des stratégies économiques et techniques des différents acteurs en place, ce que l'on nomme le régime socio-technique, empêche toute déstabilisation et évolution, même dans le cas où l'innovation pourrait être profitable au plus grand nombre.

Ce concept de verrouillage est typiquement évoqué dans le cas de la transition agroécologique (*Meynard, 2018*), visant à réorienter les systèmes de production vers des pratiques moins consommatrices d'intrants chimiques, en référence à deux spécificités de l'agriculture des pays développés : une protection des cultures principalement basée sur l'usage des pesticides, et une spécialisation des productions accompagnée d'une raréfaction de la polyculture-élevage. L'organisation intégrée, systémique, de la chaîne agroalimentaire autour de ces caractéristiques rend alors difficile la transition agroécologique car l'ensemble des acteurs économiques, technologiques, territoriaux, doivent évoluer de manière coordonnée.

La question posée est alors de savoir si le développement des technologies numériques en agriculture n'est pas lui-même porteur d'un nouveau risque de verrouillage technologique, qui viendrait limiter les chances de succès de la transition agroécologique dans toute sa diversité. En effet, le numérique apparaît comme un vecteur d'intégration très fort entre les différents acteurs de la chaîne agricole, à toutes les échelles économiques et territoriales. De plus, il est globalement parfaitement compatible avec le régime sociotechnique du modèle agricole actuel, en particulier dans son lien aux machines agricoles

(tracteur-GPS-matériel d'application modulée) ou aux technologies satellitaires, qui mettent d'ailleurs en avant l'objectif d'une meilleure maîtrise de la consommation d'intrants (Labarthe, 2010). Ainsi, le numérique pourrait venir renforcer le verrouillage sociotechnique de la situation actuelle, limitant encore plus l'émergence possible d'innovations alternatives promouvant des pratiques agricoles radicalement plus écologiques et moins productivistes, qui pourraient ultérieurement venir faire évoluer le système actuel. La digitalisation serait ainsi caractérisée par une forme de dépendance au sentier ⁶², excluant des formes alternatives d'agricultures (Clap et Ruder, 2020). Ce n'est donc pas tant le risque d'une agriculture numérique « non écologique » qui est souligné, mais celui d'une numérisation de l'agriculture qui accompagne et qui renforce le modèle dominant productiviste, qu'il s'agit justement de faire évoluer vers une agriculture plus agroécologique.

Distendre le lien de l'Homme à la nature

La révolution numérique et les nouvelles technologies qui l'accompagnent ont pour impact majeur chez l'Homme de transformer ses perceptions et représentations du monde, en proposant des interfaces qui sont supposées étendre et enrichir ses capacités corporelles et cognitives.

En agriculture, ce développement du numérique se traduit par des « agriculteurs augmentés » grâce à des capteurs et des robots intelligents, qui constituent une interface nouvelle entre eux et le monde vivant de l'exploitation agricole, animaux ou plantes. Dans le domaine des sciences sociales, plusieurs travaux portent ainsi sur les conséquences de ces nouvelles interfaces, particulièrement en élevage où il s'agit par exemple d'étudier si la « *machine sépare l'Homme de la matière* » via la *data*, ou encore si le robot est « *un facteur de liberté ou d'emprisonnement des bêtes et des Hommes* » (Lagneaux et Servais, 2014). Si le monde des plantes reste encore peu exploré, des premiers travaux commencent à porter néanmoins sur les transformations apportées par le numérique à nos relations avec les plantes (Javelle et al., 2021).

Au-delà du risque de perte de lien matériel à la nature par le fait de l'augmentation des interfaces numériques, plusieurs auteurs abordent également la question de la réification du vivant amenée par l'agriculture de précision, et des risques éthiques que cela soulève (Bos et al., 2018). C'est tout particulièrement le cas pour l'élevage, pour lequel la technologisation et l'artificialisation croissantes des modes de production agricole évoquent pour certains un possible transanimalisme⁶³

62. La notion de dépendance au sentier (*path dependence* ou dépendance au chemin emprunté) s'est développée en science politique au cours des années quatre-vingt-dix, pour souligner le poids des choix effectués dans le passé et celui des institutions politiques sur les décisions présentes.

63. Droit Animal Ethique & Sciences (2017). *Transanimalisme, animaux augmentés, animaux cyborg : vers un statut de « sous-machine » ?* 93, <https://www.fondation-droit-animal.org/documents/revue93.pdf>

visant à développer des animaux « augmentés », dans le but certainement d'en améliorer le bien-être, mais également d'en accroître la productivité. Quels sont les impacts de cette approche réductionniste, qui renforce l'image de l'animal-machine (Meuret et al., 2013) sur la relation homme-animal (Larrère et Larrère, 1997), mais aussi sur l'efficacité de la globalité du système de production ? Quels regards les citoyens portent-ils sur cette agriculture ? Autant de questions abordées par les sciences humaines et sociales en lien avec les sciences agronomiques.

Contribuer à l'empreinte environnementale croissante du numérique

Par ailleurs, le numérique a une charge environnementale aujourd'hui peu ou pas prise en compte en agriculture. Comme pour les autres domaines de la société, le développement du numérique en agriculture va impliquer une multiplication des équipements de captation de données, de transferts (déploiement des réseaux de capteurs sans fil, voire usage de la 5G), de stockage et de calcul (cf. les plates-formes proposées par les tractoristes), nécessitant des composants et systèmes électroniques toujours plus puissants et toujours plus énergivores, avec toutes les conséquences environnementales⁶⁴ que cela implique (épuisement des ressources, changement climatique, etc. (Marquet et al., 2019)).

En savoir +

La chaîne agroalimentaire représente aujourd'hui 13 % de la consommation énergétique totale française (en particulier, pour le maintien de la chaîne du froid) ; la part du numérique tous secteurs confondus s'élève à 12 % de la consommation électrique et 3 % de la consommation énergétique totale, le contributeur majeur étant les flux vidéo. Si les chiffres actuels en agriculture ne paraissent pas spécialement alarmants, l'augmentation de la part du numérique agricole dans ce bilan doit toutefois être surveillée.

La multiplication des capteurs connectés de toute sorte augmenterait le recours à des ressources comme les métaux précieux (argent, or, palladium) et les terres rares (néodyme, praséodyme, gallium, germanium, etc.) présents dans ces composants électroniques, et dont l'extraction et la séparation nécessitent une quantité énorme d'énergie et d'eau, au sein de sites de production très inégalement répartis sur Terre et aujourd'hui principalement situés en Chine (Pitron, 2018). Elle poserait aussi des défis en termes de gestion de fin de vie des matériels avec un risque de dissémination de déchets technologiques non réellement contrôlée, à

64. <https://www.lemonde.fr/blog/binaire/2019/01/29/impacts-environnementaux-du-numerique-de-quoi-parle-t-on/>

l'instar de ce que l'on observe pour le retraitement des téléphones portables en France : seuls 15 % des appareils sont collectés en regard des plus de 25 millions de téléphones mis sur le marché chaque année, et ce malgré l'existence de la filière DEEE de retraitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (Blandin, 2016).

5.2 Renforcement des inégalités et des rapports de forces

Un des risques associés au mouvement de digitalisation de l'agriculture, signalé dès les années quatre-vingt-dix (Wolf et Buttel, 1996), réside dans un renforcement d'une trajectoire d'industrialisation de l'agriculture, dont les conséquences sociales et environnementales sont l'objet de controverses. Il y aurait une forme de coévolution entre la diffusion des technologies numériques et la concentration de la production dans des unités de production toujours plus grandes, orientées vers la recherche d'efficacité et les gains de productivité, au détriment d'autres formes d'agriculture ou de populations de travailleurs agricoles. Ces risques sont discutés par des approches inscrites dans différentes disciplines des sciences humaines et sociales, principalement en sociologie, en sciences politiques et en économie institutionnelle (Klerkx et al., 2019).

Des risques d'exclusion

Les risques d'exclusion associés à l'agriculture numérique sont multiples. Ils renvoient à différents débats sur la diversité et la coexistence des modèles de production agricole.

Un premier risque est relatif aux exploitations agricoles de petite dimension économique. La question de l'exclusion des petites exploitations n'est pas propre aux technologies numériques : il a été montré comment la modernisation de l'agriculture française a pu exclure les petites exploitations agricoles, notamment par les économies d'échelle qui caractérisent le développement technologique (Deléage, 2013). La digitalisation s'inscrirait donc dans cette trajectoire technologique de l'agriculture basée sur l'agrandissement des exploitations agricoles. Elle pourrait même l'accélérer, car intrinsèquement, certaines technologies numériques (par exemple celles basées sur les images satellitaires) nécessitent des tailles minimales de parcelles ou de surfaces agricoles pour être profitables. Ce risque d'exclusion est à rapprocher de l'inadéquation présentée en 5.1 entre les technologies numériques et certaines formes d'écologisation de l'agriculture, qui nécessitent des reconceptions plus profondes des systèmes de production.

Un deuxième risque est celui de renforcer une précarisation du travail agricole, dans un contexte de croissance de la part du salariat dans l'emploi agricole et de recherche de réduction des coûts du travail pour accroître la productivité des exploitations. Le développement de la robotique, en se substituant à la main d'œuvre ou en la réduisant à certaines activités plus qualifiées, pourrait renforcer encore la précarité de certaines populations, et notamment des populations pauvres de travailleurs immigrés.

Troisième risque, les difficultés d'accès aux technologies numériques, et/ou aux compétences nécessaires à leur utilisation, seraient aussi un facteur d'exclusion dans le domaine agricole. Ce débat rejoint en partie celui lié à la fracture numérique (*digital divide*) et au risque d'exclusion de certains territoires ruraux en retard d'équipements numériques infrastructurels.

Perte d'autonomie des agriculteurs

Des recherches en sociologie rurale ont examiné les implications que pourrait avoir la digitalisation sur l'autonomie décisionnelle des agriculteurs et le sens qu'ils donnent à leur métier. Elle peut avoir des répercussions importantes sur le tissu culturel des zones rurales et des agriculteurs, car elle affecte ce que signifie être un agriculteur (*Burton et Riley, 2018*). La numérisation peut faire passer la culture agricole d'une gestion « pratique » et fondée sur l'expérience à une approche axée sur les données. Elle pourrait « discipliner » les routines de travail des agriculteurs, en les conditionnant à travers une nouvelle forme de « rationalité algorithmique » (*Miles, 2019*). En conséquence, une numérisation échappant au contrôle des agriculteurs est un sujet de débat⁶⁵. Des questions ont également été soulevées concernant l'effet de la numérisation sur l'autonomie des agriculteurs, y compris la crainte que les agriculteurs ne deviennent des « travailleurs de données » (*Rotz et al., 2019*).

Contrôle par l'aval et par l'amont

Une autre interrogation réside dans les rapports de force que la digitalisation pourrait renforcer entre l'agriculture et ses secteurs d'amont et d'aval. L'agriculture a souvent été décrite comme un secteur dominé par l'amont et l'aval, et notamment par son amont (machinisme, industrie chimique, semences...) pour les dynamiques d'innovation. Différents auteurs s'interrogent donc sur la façon dont la digitalisation s'inscrit dans les transformations (ou dans le renforcement) des rapports de l'agriculture à d'autres secteurs.

65. <https://www.amisdelaterre.org/communique-presse/nouveau-rapport-agriculture-et-numerique-vers-une-fuite-en-avant/>

Avec l'amont, les technologies numériques pourraient accroître la dépendance des agriculteurs à certains intrants (pesticides, engrais minéraux...) tout en optimisant et réduisant leur utilisation. Ce paradoxe est notamment lié au fait que les technologies numériques s'incarnent dans des équipements spécifiques qui embarquent des modèles, standardisent les modes de décision et induisent des asymétries de connaissances. Elles changent le contrôle des connaissances (Bronson et Knezevic, 2016).

Avec l'aval, les nouveaux outils de partage et de contrôle de l'information (et notamment les technologies de type *big data* et *blockchain*) peuvent changer ou renforcer la place de différents acteurs dans les écosystèmes d'innovation et les chaînes de valeur. Les questions posées sont celles des conséquences sur le partage de la valeur, sur la gouvernance des filières, sur le risque de formes de filialisation de l'agriculture et de contrôle par les firmes d'agroalimentaire situées en aval de l'agriculture.

Un nouveau questionnement est lié au rôle que peuvent jouer de nouveaux acteurs, à savoir les firmes du secteur des technologies numériques, des startups aux multinationales ; des géants du numérique ont par exemple réalisé des investissements significatifs en agriculture, parfois de façon jointe avec des équipementiers. Ces investissements s'accompagnent eux aussi de nombreux questionnements sur la gouvernance des données en agriculture, sur la capacité des acteurs du secteur agricole à contrôler les connaissances qui sont intégrées dans les technologies numériques et à capter la valeur qu'elles produisent (Carbonell, 2016).

Les technologies numériques sont donc associées à des dynamiques intersectorielles qui appellent à mener des recherches pluridisciplinaires sur les changements institutionnels induits et sur d'éventuels risques de verrouillage (Carolan, 2020 ; Labarthe, 2010).

Accès à l'information et à la formation, et quel rôle pour le conseil ?

Une particularité fondamentale des technologies numériques est qu'elles ne sont pas neutres pour les systèmes d'innovation et de connaissances agricoles : elles peuvent transformer en profondeur la façon dont se construisent et se diffusent les connaissances et les informations au sein du secteur (Busse et al., 2015).

Des travaux récents font ainsi part des potentialités mais aussi des menaces que font peser les technologies numériques sur certains acteurs ou certaines fonctions au sein des systèmes d'innovation. C'est notamment le cas du conseil agricole, dont les acteurs, les méthodes, le contenu, voire la légitimité même, sont profondément questionnés par les technologies numériques (Fielke et al., 2020).

Il y a pourtant de nombreux enjeux autour du rôle que le conseil ou d'autres intermédiaires des systèmes d'innovation peuvent jouer avec l'avènement du numérique : comment intégrer des informations de plus en plus nombreuses sans générer un trop grand stress ou une pression psychologique pour les agriculteurs ? Qui sera capable d'évaluer et de comparer l'efficacité, la robustesse et la pertinence de différents outils numériques ? Qui pourra contrôler le contenu de ces connaissances (modèles agronomiques, tests de validité, etc.) embarquées dans ces outils et applications ?

La question de l'impact du numérique sur la diffusion des informations et des connaissances au sein du secteur agricole renvoie également au problème des inégalités, soulevé dans la sous-section précédente. Ces inégalités sont liées à des questions d'accessibilité (financière, cognitive, connectique) aux technologies numériques. La question de l'inégalité d'accès au conseil et à l'information n'est pas nouvelle (*Mundler et al., 2006*) ; il s'agit de savoir si le numérique sera un vecteur de réduction ou d'accroissement de ces inégalités. Cela renvoie à des questions de coûts et d'équipements des territoires ruraux en infrastructures numériques, mais pas seulement : il s'agit aussi de former la population agricole et rurale, dans toute la diversité des groupes sociaux qui la composent, afin de lui permettre d'acquérir les compétences nécessaires à une utilisation efficace et pertinente de ces technologies.

5.3 Perte de souveraineté

Le rapport final de la commission d'enquête du Sénat « Souveraineté numérique » de 2019 (Longuet, 2019) démontre que la question de la souveraineté numérique est on ne peut plus actuelle. Ce rapport souligne en particulier le fait que cette question constitue pour la France un triple défi « éthique, de sécurité et de liberté économique », dans un contexte dans lequel nos sociétés sont confrontées à une mise en cause de leurs valeurs, et où l'Homme est « de plus en plus une somme de données à exploiter ». Bien que l'agriculture soit un domaine où la question de la souveraineté nationale, à l'échelle individuelle ou collective, peut apparaître comme assurée de manière évidente (production par essence ancrée sur les territoires, lien culturel fort aux terroirs, rôle historique de la puissance publique dans l'organisation et l'appui à la production agricole, importance reconnue en France d'une recherche agronomique publique, la PAC pilier de la construction européenne), le développement des technologies numériques en agriculture fait apparaître de nouveaux enjeux forts liés à la souveraineté numérique (*Klerkx et al., 2019*).

Perte d'autonomie dans la maîtrise de l'alimentation

La numérisation croissante de la chaîne producteurs – transformateurs – distributeurs – consommateurs, qui vise principalement à rationaliser l'offre de production face aux besoins, minimiser les coûts de logistique et de transformation, et maximiser la satisfaction des consommateurs, conduit potentiellement à une intégration toujours plus grande de l'agriculture. La question de la souveraineté se pose dès lors qu'un acteur devient monopolistique dans le contrôle d'un secteur, comme on peut le voir avec l'offensive actuelle d'un géant du numérique comme Amazon dans le domaine de la distribution alimentaire⁶⁶. On peut également évoquer ici le développement rapide de l'usage des outils connectés sur *smart-phones* pour l'évaluation des aliments et autres produits de consommation (impact environnemental, qualité nutritive), qui peut à terme impacter fortement les modes de consommation⁶⁷. Le contrôle démocratique de ces nouveaux outils grand public n'est pas nécessairement assuré, avec le risque là encore de situation monopolistique. Enfin, le modèle économique de la transition numérique repose en partie sur des startups, dont certaines visent à se faire racheter par des grands groupes, ce qui soulève intrinsèquement des questions de souveraineté nationale quant aux technologies et services numériques qui seront développés pour l'agriculture et aux données qui en seront issues (*Schneider, 2020*).

Confiscation des données agricoles

La souveraineté numérique passe par la maîtrise de la donnée. Que ce soit du fait des grands constructeurs d'agroéquipements ou des géants du numérique, le risque existe d'une confiscation des données agricoles, soit par simple fermeture de l'accès aux données, soit par leur ouverture dans des formats non pratiquement manipulables. Un cheval de Troie de la collecte de données en agriculture est la machine agricole, comme les robots de traite en élevage mais aussi les tracteurs et machines de récolte pour les grandes cultures. Sur ces machines agricoles, des capteurs de plus en plus nombreux recueillent des données sur les opérations effectuées, et les transmettent aux constructeurs. Les contrats d'achat régissent leur usage au bénéfice du constructeur (une cession globale des données agricoles y est souvent stipulée), et entretiennent la non-transparence sur la chaîne des données (que contiennent-elles, où vont-elles, pour quoi faire ?), ainsi qu'un quasi verrouillage (il peut être très difficile pour les agriculteurs de pouvoir simplement disposer efficacement de leurs données, encore plus de les valoriser) (*Carbonnel, 2016*). La profession est consciente de ce risque, et les agriculteurs français se sont

66. <https://siecledigital.fr/2020/08/31/amazon-ouverture-de-son-premier-supermarche-connecte-amazon-fresh/>

67. <https://www.capital.fr/conso/peut-on-faire-confiance-a-yuka-pour-ses-courses-1319721>

organisés via la charte *Data Agri*⁶⁸ proposée par les syndicats FNSEA et JA, pour améliorer la maîtrise, la transparence et la sécurité des données agricoles dans les contrats. La France apparaît ainsi comme relativement en avance en Europe sur la réflexion autour de l'usage des données agricoles, dans une démarche qui vient compléter de manière indépendante la réglementation RGPD sur les données personnelles.

Le partage des données agricoles est une priorité à la fois pour la profession agricole et pour la recherche agronomique afin de soutenir le développement des connaissances agronomiques et des technologies et services numériques en agriculture. C'est également un enjeu fort de souveraineté numérique. La plate-forme *Agdatahub*⁶⁹ d'échanges de données utiles au secteur agricole, et à l'initiative de nombreuses organisations agricoles (chambres d'agriculture, instituts techniques...) et entreprises, est un bon exemple de la volonté et de la possibilité d'organiser un système de confiance autour de la donnée (choix des sociétés françaises *DAWEX* et *3DS OUTSCALE* pour la plate-forme *Agdatahub*).

Perte de maîtrise de l'outil de production

La question de la souveraineté se pose également au niveau de la maîtrise des outils de production agricole. La numérisation se traduit par une complexification croissante de ces outils (*Bournigal, 2014*), avec une maintenance de plus en plus difficile, que ce soit pour les agriculteurs ou pour les concessionnaires qui subissent ainsi une perte d'autonomie technique. Il en est de même au niveau de la formation, car les enseignants des lycées agricoles rencontrent des difficultés à former les jeunes futurs professionnels utilisateurs des agroéquipements, dans un domaine de haute technologie et en grande mutation (*Isaac et Pouyat, 2015*).

Par ailleurs, la question de la souveraineté se pose également avec l'absence d'entreprises nationales parmi les leaders du machinisme agricole (*AGCO, John Deere, New Holland, Lely, De Laval*), même si la France possède plusieurs entreprises pionnières en robotique mobile agricole (par exemple *Naiio Technologies*).

Un enjeu de cybersécurité

Dans le domaine de la cybersécurité, un premier enjeu concerne les risques d'attaques via les objets et capteurs connectés (*Dhar, 2021*). Soit l'objet connecté devient lui-même une source d'attaque du type *deny of service*, soit il est piraté pour en prendre le contrôle dans un but malveillant. Ce dernier cas est le plus à

68. <https://www.data-agri.fr/>

69. <https://agdatahub.eu/>

craindre, particulièrement dans le cas de systèmes agricoles très intégrés dans lesquels l'agriculteur aura laissé beaucoup d'autonomie au système de contrôle automatique (serres automatiques, robots de traite, etc.). Le fait que ces objets soient souvent produits hors d'Europe et que nous n'ayons pas la main sur leur conception (pour assurer une *security by design*) doit nous rendre d'autant plus vigilants sur l'existence possible de *backdoors* informatiques.

Un second enjeu relève plus globalement de la protection contre la récupération et le piratage (vol, altération, destruction) de données agricoles. Les choix de conception des plates-formes de partage de ces données ont bien sûr un impact fort sur le niveau de protection envisageable. Même si les cas majeurs de cyberattaques concernent pour l'instant des organismes stratégiques pour nos sociétés (hôpitaux, aéroports, banques, etc.), l'importance vitale de nos systèmes de production et consommation alimentaire pourra dans l'avenir les transformer en cibles potentielles (Gupta et al., 2020).

5.4 Accentuation de vulnérabilités et rendements négatifs

Vulnérabilités du système agroalimentaire

Comme nous l'avons décrit en 2.3, l'activité agricole moderne interagit avec un ensemble de filières et d'acteurs de tailles et de natures très diverses. Les chaînes logistiques ou décisionnelles qui en résultent sont très « longues ». L'activité agricole s'insère aussi dans des territoires tendanciellement de plus en plus spécialisés (Bowler, 1986). Le fonctionnement de ce système repose sur de très nombreuses et de très fortes relations de dépendance asymétriques entre ces acteurs. Il repose aussi sur des usages intensifs de technologies dont les utilisateurs deviennent progressivement dépendants. La digitalisation de ce système pourrait accroître des dépendances entre plusieurs de ses éléments et en créer de nouvelles⁷⁰ (ces évolutions amplifient les risques que le fonctionnement partiel ou interrompu d'un élément soit à même de paralyser l'ensemble du système. Ces problèmes de blocage et d'interdépendance ont bien été mis en lumière lors de la crise de la Covid-19 avec l'émergence de plusieurs points de tension à différents endroits du système agroalimentaire⁷¹. En désorganisant les chaînes logistiques, la crise due à la Covid-19 a aussi amené à l'émergence de pénurie de biens dans de nombreux secteurs dont le cuivre et les puces électroniques, mettant ainsi en évidence la réalité des risques liés à leur dépendance (Bouissou et

70. Cf. section 5.1 (« Verrouiller la transition agro-écologique ») et section 5.2.

71. Par exemple les risques liés à la logistique et à l'arrêt des flux migratoires, ceux liés aux instabilités générées par la mise en place de politiques nationales non collaboratives de type « chacun pour soi »...

Albert, 2021). Cette alerte devrait être d'autant plus saisissante qu'un certain nombre de chocs (régionaux et systémiques) prévisibles dans les deux prochaines décennies⁷², en particulier le pic pétrolier (Delannoy et al., 2021), auront très probablement un impact bien supérieur sur tout le fonctionnement de la société, en particulier celui du système agroalimentaire (Servigne, 2014). Alors qu'il est désormais critique d'augmenter la résilience du système agroalimentaire, la numérisation de celui-ci risquerait ainsi de le fragiliser en le rendant plus vulnérable.

Complexification, rendements décroissants et risques associés

Comme établi précédemment, le système agroalimentaire repose sur de nombreux acteurs, filières et territoires de plus en plus spécialisés et de tailles et de natures très diverses. Il repose aussi sur de nombreux mécanismes de régulation et de nombreuses relations de dépendances. Ainsi aujourd'hui, l'agriculture et ses secteurs amont et aval forment un système sociotechnique complexe au sens de Tainter (Allen et al., 1999).

Tainter a pu démontrer que les sociétés humaines se complexifient tendanciellement à mesure qu'elles résolvent les problèmes auxquels elles sont confrontées – parce que les solutions déployées nécessitent l'ajout de nouveaux éléments dans le système et l'introduction de nouvelles régulations (Tainter, 1990 ; Chambaz, 2019). Cette complexité est « payée » *in fine* en dépenses énergétiques : plus

une société devient complexe, plus elle nécessite d'énergie pour assurer son fonctionnement de base (Tainter, 2016). Ce problème est amplifié par le fait que l'accroissement en complexité suit la loi des rendements décroissants : à partir d'un seuil, les bénéfices de l'augmentation en complexité d'une société s'accroissent moins rapidement que les coûts, jusqu'à une situation critique où les coûts peuvent devenir plus importants que les bénéfices⁷³ (on parle alors de rendements négatifs), comme cela a pu être observé peu avant l'effondrement de plusieurs civilisations (Tainter, 2009). L'enjeu de la complexité est donc de maintenir son coût énergétique global en dessous des bénéfices qu'elle prodigue, sans quoi le risque est que la trajectoire d'évolution du système échappe à tout contrôle et que toute tentative de correction du système aboutisse en réalité à accroître sa volatilité, sa vulnérabilité et son incontrôlabilité.

72. Et dont la probabilité et l'intensité vont s'amplifier dans les décennies suivantes ! Cf. Chapitre 2.

73. Ces phénomènes de rendements décroissants puis négatifs sont largement étudiés et documentés, notamment en agriculture (Brue, 1993), dans la sécurité (Elhefnawy, 2004), l'extraction d'hydrocarbures (Tainter et Patzke, 2012) ou plus généralement dans l'évolution macroéconomique mondiale (Elhefnawy, 2008).

Le système agricole et alimentaire est déjà un système sociotechnique particulièrement complexe dont les coûts globaux comprennent des coûts indirects (parfois très éloignés) liés aux externalités négatives telles que les impacts environnementaux, sanitaires et sociopolitiques, qui sont invisibles ou ignorés par la grande majorité des acteurs (cf. 2.1). Notre incapacité à évaluer ces coûts globaux consolidés (énergie, matière, pollutions), notre inaptitude à nous situer dans la dynamique susmentionnée, nous font donc potentiellement prendre des risques majeurs à chaque complexification supplémentaire du système.

Il est donc sans doute nécessaire aujourd'hui de s'interroger sur les effets du développement du numérique par rapport à ce risque, en particulier dans l'agriculture. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la numérisation croissante de la chaîne agroalimentaire risque de complexifier encore davantage ce système, et de renforcer et étendre les liens et dépendances. Un usage incontrôlé de l'IA et du *big data*⁷⁴ pourrait nous enfermer davantage dans une spirale de complexité croissante.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parcouru un ensemble de risques qui accompagnent le développement du numérique en agriculture. Ces risques sont de natures différentes, et portent sur des dimensions économiques, politiques, sociétales, psychologiques, environnementales, etc. Ces risques pourraient potentiellement être inhérents au déploiement de ces technologies : il est possible qu'ils ne puissent être évités voire contrôlés. Le déploiement et les usages de ces technologies dépendent évidemment des recherches menées en amont, mais ils dépendent aussi et surtout, *in fine*, de la façon dont les acteurs s'en emparent (citoyens, agriculteurs, acteurs de l'agro-industrie et agroalimentaire, acteurs politiques) et du fonctionnement global de la société (modèle économique, régime politique, cadres normatifs, idéologies...). La difficulté pour les sociétés de contrôler le développement du système technique a d'ailleurs été identifiée depuis longtemps (Ellul, 1977). Il est indispensable de prendre tous ces éléments en compte dans l'orientation des recherches futures sur ce domaine, comme nous tentons de le faire dans l'identification de défis présentés dans le chapitre 6 pour un numérique responsable, pertinent et partagé.

74. Car, avec ces technologies, la quantité et la complexité des services et matériels requis vont significativement s'accroître (généralisations, circulations, stockages et traitements des données — capteurs, plates-formes, réseaux...).

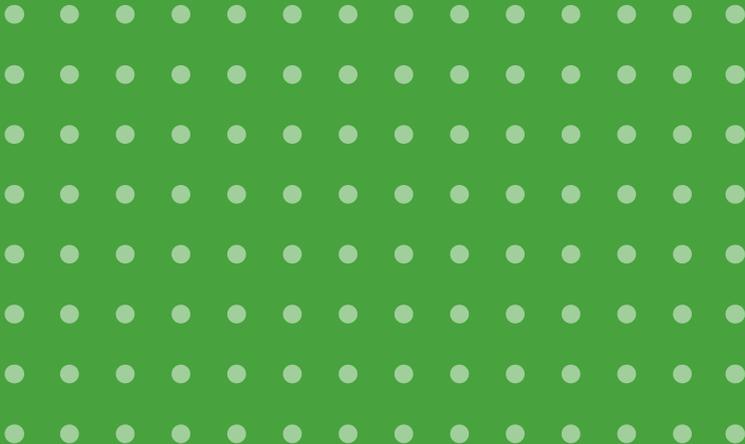


Les défis de demain

Comment fournir des outils numériques
pour aider à répondre aux enjeux et manques
en agriculture

Auteurs – Ludovic Brossard, Véronique Bellon-Maurel, Pierre Bisquert,
Tassadit Bouadi, Frédéric Garcia, Roland Lenain, Pierre Labarthe, Evelyne Lutton,
Pierre Maurel, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.

Remerciements (contribution, relecture, édition) – Lluís Miquel Pla Aragones,
Isabelle Piot-Lepetit, Emmanuel Prados, Xavier Reboud.



Ce chapitre est consacré à la mise en exergue des besoins et des défis de demain posés par le développement d'une agriculture numérique responsable au service de l'agroécologie, d'une diversité d'agricultures (incluant l'agriculture familiale) et de systèmes alimentaires durables. L'objectif est d'aller au-delà de l'état de l'art (chapitre 3) et de répondre aux opportunités d'un numérique au service de la transition agroécologique et de chaînes de valeur rééquilibrées (chapitre 4), tout en évitant les risques identifiés (chapitre 5). Il se concentrera sur les défis de recherche technologique, tout en notant les défis économiques et organisationnels associés, particulièrement marqués en agriculture.

L'analyse des besoins pour favoriser la mise en œuvre de l'agroécologie et des chaînes de valeur rééquilibrées nous amène à les organiser en quatre sections :

- mieux gérer collectivement, en intégrant l'échelle des territoires ;
- mieux gérer l'exploitation agricole ;
- rééquilibrer la chaîne de valeur, de l'amont à l'aval ;
- créer et partager des données et des connaissances.

6.1 Fournir des outils numériques pour la gestion collective à l'échelle du territoire

Trois défis ont été identifiés pour répondre aux verrous reliés au numérique dédié à la gestion des territoires (chapitre 4.3) :

- la mesure et la surveillance (*monitoring*) à large échelle ;
- la visualisation des données ;
- les dispositifs numériques de participation, de médiation et de gouvernance.

Surveillance et mesure à l'échelle territoriale

L'ambition d'une agriculture moins artificialisée qui valorise mieux les atouts locaux et le renouvellement naturel des ressources est conditionnée par la capacité à bénéficier des flux de matière, des potentiels de régulation biologique et des fonctionnalités étendues au-delà de la ferme (services écosystémiques, écologie des territoires). Les interactions sont multiples et ne peuvent être appréhendées que dans leur dimension de système. Cela repousse les bornes du périmètre à considérer, à la fois dans l'espace et dans le temps : certaines caractéristiques s'apprécient à l'échelle d'un territoire comme le degré de traversabilité (qui

dépendra de l'intensité des trames vertes ou bleues⁷⁵ qui le sillonnent), d'autres sont à considérer dans le temps comme la capacité de résilience et de vitesse de reprise face à des aléas climatiques. Ainsi, vouloir mobiliser des principes de l'agroécologie nécessite de quantifier des grandeurs difficilement perceptibles par les moyens classiquement mis en oeuvre. Cela mobilise des besoins de mesure et de surveillance (*monitoring*), d'évaluation (modélisation) et de gestion des données à de grandes échelles.

En termes de mesure et de surveillance, il s'agira d'identifier les données pertinentes, utiles et actuellement manquantes pour gérer collectivement l'agriculture à l'échelle territoriale et construire les outils permettant de les obtenir, avec les défis suivants :

- La mesure de nouvelles grandeurs, difficiles à appréhender (comme la biodiversité, la qualité des sols et de l'eau), de la façon la moins intrusive et la plus frugale possible ;
- Le réglage de la fréquence d'échantillonnage (temporelle et spatiale), point crucial en théorie de l'information. Les systèmes collectent des données, soit régulièrement – à granularités plus ou moins grandes dans le temps et l'espace (réseaux de capteurs) – soit sporadiquement (*crowdsourcing*, applications mobiles, véhicules de collecte mobiles, robots, drones). Les réseaux devront s'adapter à ces types de données présentant des modèles de trafic différents afin de les acheminer dans les délais impartis avec un taux de perte minimal. Cette question s'applique à toutes les échelles et sera complétée dans la partie 6.2 ;
- La gestion de l'hétérogénéité des données. Celle-ci est issue de la diversité des objets observés, des techniques de captation et de collecte (incluant le *crowdsourcing*), des acteurs, des grandeurs mesurées, des formats (valeur, images, localisation, etc.), des propriétés métrologiques (précision, fréquence, etc.). Gérer ces hétérogénéités nécessite le développement de méthodes *ad hoc* de filtrage et de fusion. La fusion pourra parfois s'effectuer à différents niveaux et de façon plus ou moins itérative, en tenant compte de l'incertitude liée à chaque donnée, de la variabilité de cette incertitude et de ses conséquences sur la suite de la chaîne d'information. Ces questions se posent pour tous types de données, physiques, biologiques, économiques, sociales, etc. Pour produire des bilans cohérents (par exemple de flux de matières) et leurs incertitudes associées,

75. La trame «verte» fait référence aux milieux naturels et semi-naturels terrestres et la trame «bleue» aux réseaux aquatiques et humides (fleuves, rivières, étangs, tourbières). La trame verte et bleue est un ensemble de continuités écologiques permettant le déplacement de populations d'espèces. Elle est constituée de corridors écologiques, assurant des connexions entre des réservoirs où la biodiversité est la plus riche et la mieux représentée. Ces corridors peuvent être des éléments linéaires (haies, bords de chemin, bandes enherbées...) ou des structures paysagères variées (<https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/trame-verte-et-bleue/>).

on mobilisera les outils mathématiques et informatiques de réconciliation de données (généralement basés sur de l'optimisation sous contraintes) (Courtonne et al., 2015).

- La gouvernance de la donnée, question exacerbée dans un système de données multisource. C'est une question générale qui sera abordée dans la partie 6.4.

Dans les pays du Sud, ces besoins sont accrus car, comme décrit en partie 4.5, ces pays manquent cruellement de capital informationnel au niveau des territoires. Or, ils sont indispensables aux administrations nationales (agriculture) et aux collectivités locales, organisations de producteurs, recherche, etc. pour l'innovation ouverte, l'anticipation des risques (climatiques, sanitaires), et une meilleure organisation des territoires et des filières. Dans ce contexte, il sera nécessaire d'intégrer dans nos recherches sur ces sujets des difficultés supplémentaires dues aux obstacles liés à la fracture numérique, à l'illettrisme, à la diversité des dialectes... Ces difficultés offrent en contrepartie aussi des pistes de recherche pour repenser nos systèmes et méthodes et les adapter à ce contexte.

Visualisation

La gestion de données à grande échelle territoriale nécessite de révolutionner nos méthodes de visualisation. Du fait de ses spécificités, le monde agricole porte des questionnements de recherche qui ne trouvent pas encore d'écho dans le domaine de la visualisation, comme :

- visualiser des données hétérogènes, multiéchelles parfois massives, parfois rares : données spatiales, symboliques, temporelles, variables, incomplètes, incertaines, erronées, semi-quantitatives, voire qualitatives selon des structurations variées telles que cartographies (SIG), images (issues de satellites, drones), séries temporelles, graphes et réseaux ;
- visualiser des échelles extrêmes, les mettre en relation de façon fluide et claire, à courte ou longue distance (temporelles, géographiques), élaborer des outils d'agrégation et de statistiques pertinents et adaptés ;
- faire apparaître de nouvelles informations de façon semi-automatique par confrontation de cartographies ou de séries temporelles, pour mettre en évidence des régularités, des tendances, des corrélations ;
- répondre à des besoins contradictoires tels que, par exemple, visualiser des données massives, mais avec des applications mobiles (téléphones portables, tablettes), ou guider les utilisateurs tout en respectant leur autonomie ;
- trouver des représentations innovantes d'objets complexes, de dépendances ou de modèles, mobilisables par des acteurs d'horizons très différents.

Ces questionnements ouvrent de nouvelles perspectives pour certains sujets fondamentaux, comme par exemple la visualisation d'incertitudes (*Boukhelifa et Duke, 2009 ; Potter et al., 2012*) et la visualisation progressive (*Fekete et al., 2019*) à la charnière entre visualisation et IA. Notons que, concernant la visualisation, les questions de confidentialité et de droits d'usage des données restent pour l'instant relativement en retrait ou marginalement évoquées à propos de la construction de la confiance (*Charvat et al., 2018*). Les questions listées ci-dessus pourraient à terme faire émerger une recherche en visualisation et IHM propre au secteur agricole.

Dispositifs numériques de médiation et gouvernance

L'approche multiacteur est incontournable à l'échelle des territoires et nécessite des outils d'accompagnement : le mode de production de la connaissance change, avec une recherche transdisciplinaire impliquant fortement les parties prenantes externes, ce qui peut être facilité à l'heure du numérique (*Bergez et al., 2019*). Dans les filières à l'échelle territoriale, le télescopage des intérêts individuels et collectifs est de plus en plus fréquent (*Ryschawy et al., 2019*). De nouveaux dispositifs numériques, issus de l'ingénierie territoriale sont attendus, pour faciliter le dialogue au sein du monde agricole et avec les autres acteurs des territoires (figure 2).

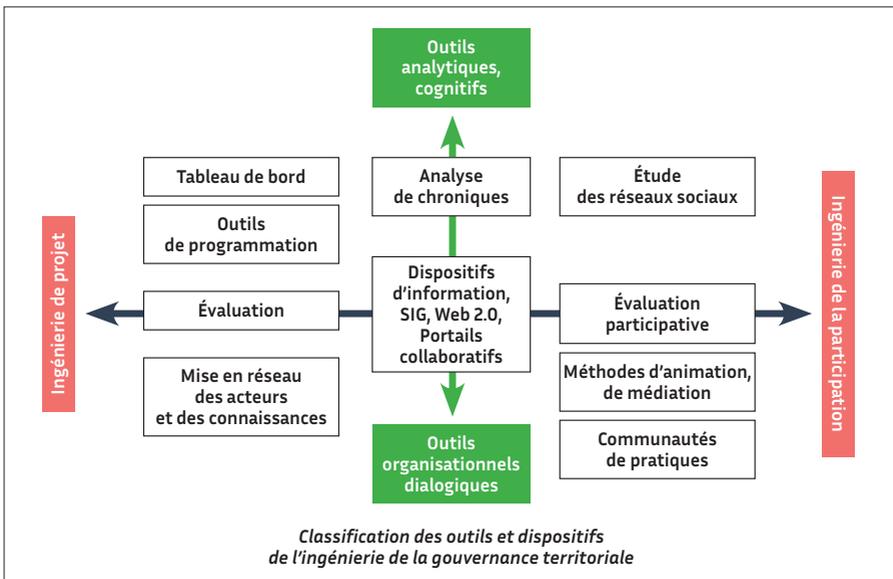


Figure 2 : Outils et dispositifs de l'ingénierie de la gouvernance territoriale (Rey-Valette et al., 2011).

Ces outils et dispositifs numériques pourront remplir une diversité de fonctions : analytiques, créatives, cognitives, relationnelles, décisionnelles, opérationnelles (Rey-Valette *et al.*, 2011). Ils pourront contribuer également à la structuration de l'action collective en facilitant la participation et l'innovation ouverte, la prise de décision collective et la médiation.

LA PARTICIPATION ET L'INNOVATION OUVERTE

Le numérique peut offrir des supports pour mettre en œuvre l'innovation ouverte et la participation. Face à des problèmes complexes, approches analytiques (en laboratoire) et participatives (avec des parties prenantes d'horizons divers) doivent ainsi être pensées conjointement, le numérique pouvant servir de passerelle entre les deux (modélisation et visualisation pour faciliter la négociation).

Pour motiver les agriculteurs à s'engager dans la transition agroécologique, les démarches pas à pas sont privilégiées et une capacité d'organisation collective du changement est nécessaire. De nouveaux outils numériques sont attendus pour équiper les démarches participatives : modèles d'accompagnement, ludification numérique, outils numériques d'analyse des séances participatives (traitement vidéo et audio pour l'identification et l'étiquetage des acteurs et des points de vue, etc.).

Par ailleurs, l'innovation ouverte génère des besoins de recherche complémentaires mobilisant les sciences de gestion, les sciences sociales et le droit : sur la nature des collaborations et des sources d'information en innovation ouverte assistée par le numérique, sur les modèles économiques, sur la gestion des savoirs tacites, etc. (Enkel *et al.*, 2020). L'évaluation de l'apport inventif de chacun dans un processus d'innovation ouverte destiné à une protection intellectuelle, aussi connu sous le terme de « paradoxe de l'ouverture » (Arora *et al.*, 2016), soulève des questions en droit et en sciences économiques. Enfin se pose la question de la manière dont les réseaux d'apprentissages s'organisent pour faciliter l'innovation en agriculture numérique (Klerkx *et al.*, 2019).

LA PRISE DE DÉCISION COLLECTIVE

Cette prise de décision s'appuie sur différents processus que sont la délibération, la négociation et le vote. Pour la délibération (Besnard *et Hunter*, 2008), en permettant l'étude logique et automatique des arguments, le numérique pourrait permettre d'assurer l'aspect rationnel d'une délibération et la correction des conclusions dérivées. Concernant la négociation (Kilgour *et Eden*, 2010), une approche plus formalisée de l'établissement de compromis équitables mènera à l'engagement et la satisfaction des acteurs et ainsi à des décisions durables.

Enfin, en étudiant l'aspect formel du vote, le numérique pourrait permettre de caractériser ces principes afin d'établir une décision pertinente et désirable, par exemple en prenant convenablement en compte les préférences exprimées (*Brandt et al., 2016*).

Il conviendra de proposer des outils faciles d'utilisation, complétant les autres modes de délibération et de prise de décisions collectives, et s'intégrant sans heurt dans le quotidien des acteurs (notamment en périodes de choix stratégiques), afin par exemple de collecter leurs arguments et préférences. La visualisation des données et des décisions semble, à ce titre, cruciale.

LA MÉDIATION

Le numérique renouvelle les objets frontières (*Trompette et Vinck, 2009*) qui font dialoguer et se comprendre des groupes sociaux aux codes, pratiques et intérêts hétérogènes, et les objets intermédiaires (*Vinck, 1999*), qui gardent une trace des différentes étapes de processus de conception collective d'un projet ou d'un système concret afin d'en renforcer l'acceptabilité et la réutilisation. En Afrique et dans les pays du Sud, l'usage des communs tels que les territoires (agropastoralisme, foresterie) ou l'eau (irrigation) reste très prégnant. Ainsi, le numérique pourrait être aussi mobilisé pour en renouveler les modalités de gestion. Les expérimentations d'apprentissage collectif, de *living labs* et de gestion concertée et participative exploitant le numérique déjà en cours, par exemple en Afrique de l'Ouest et au Maghreb, pourront être analysées et répliquées.

6.2 Aider les agriculteurs dans la conduite individuelle de l'itinéraire technique

Trois leviers pourraient être actionnés pour répondre aux verrous identifiés en 4.2 dans l'objectif d'accompagner le passage de l'agroécologie à l'échelle :

- les systèmes de suivi des animaux, des plantes et de leur environnement ;
- les outils d'aide à la décision (OAD) ;
- la robotique.

Les systèmes d'acquisition et de diagnostic

L'enjeu est ici de disposer dans les exploitations, à moindre coût économique et écologique, de données fiables et précises, pour informer l'agriculteur de façon rapide et simple sur l'état de son système (animaux, végétaux, récoltes...), et notamment détecter précocement les dysfonctionnements, et ainsi l'aider

dans ses décisions. La captation massive et raisonnée de données pourrait être aussi intéressante pour favoriser le phénotypage massif à la ferme, dans le but de créer des connaissances nouvelles en agroécologie. En élevage, s'ajoutent des contraintes sur la mesure et la transmission, des questions éthiques et un besoin avéré pour les élevages non conventionnels. Dans le cadre de l'agroécologie, une question critique est la détection des dysfonctionnements, avec le compromis « couverture » (champ spatial couvert par le système de détection) *versus* spécificité. Les mesures spécifiques (par exemple détection d'un virus ou d'une bactérie) sont complexes à réaliser : besoin de mise en contact, coût, alimentation en énergie, problème des fausses alarmes en élevage (Dominiak et Kristensen, 2017). Les recherches doivent être inclusives et s'orienter vers une « instrumentation modérée » et des dispositifs accessibles à tous les exploitants (Bergez et al., 2019 ; Dumont et al., 2018).

Les recherches sur les systèmes d'acquisition, les capteurs et IoT, les systèmes de gestion de données et de modèles numériques associés en lien avec le cœur de métier et adaptés à la stratégie de l'agriculteur pourront porter sur :

- **la création de nouveaux capteurs respectant les contraintes typiques de l'agriculture (frugalité, coût financier et énergétique).** Des compromis seront à rechercher entre l'autonomie du capteur, ses impacts environnementaux, la résolution spatiale et temporelle *versus* spécificité, la qualité de la mesure, la robustesse, l'adaptation à l'objet étudié et au milieu de mesure, et la simplicité d'utilisation et de maintenance, ces deux derniers facteurs étant essentiels pour l'adoption. Dans le même objectif de simplification des interfaces homme-machine, des recherches pourraient être consacrées au développement des dispositifs de saisie audio des informations par l'agriculteur (par exemple pour les cahiers de cultures électroniques) : reconnaissance vocale, alignement d'ontologies, etc. Enfin, pour améliorer la compréhension de ces systèmes agroécologiques, il apparaît aujourd'hui de plus en plus essentiel de tenir compte non seulement des paramètres physiques de l'environnement, mais aussi des paramètres biologiques (microbiotes du sol, ou de l'animal), ce qui devrait générer des besoins en méthodes omiques.
- **L'optimisation du mode de transfert des données de manière automatique vers le lieu de traitement pour qu'il n'ait quasiment aucun coût** (Wolfert et al., 2017), critère majeur pour le phénotypage massif à la ferme ; ceci génère des questions de recherches autour de l'alimentation énergétique des capteurs, des réseaux de capteurs (ex. intelligence distribuée)...
- La volonté de limiter le nombre des capteurs (en lien avec la frugalité) et la difficulté à mesurer facilement et de façon non invasive certaines grandeurs invitent également à des recherches sur des "smart sensors", i.e. des

combinaisons de données issues de capteurs « simples » pour estimer ces grandeurs complexes *via* des traitements de données adaptés (exemple : apprentissage automatique). L'impact de ces développements sur la qualité et l'incertitude de l'information est à étudier.

Une fois captée, l'information peut servir à l'aide au diagnostic, pour caractériser l'état du système agricole et détecter les dysfonctionnements nécessitant une action. Les recherches pourront porter sur la construction de modèles de diagnostic. Si ce questionnement n'est pas spécifique à l'agriculture et peut être retrouvé dans d'autres secteurs, les recherches devront intégrer la connaissance métier (agriculture) pour aborder les questions prioritaires suivantes :

- le choix des indicateurs à intégrer, la prise en compte de la variabilité naturelle des indicateurs, propagation des incertitudes issues des indicateurs, sensibilité et spécificité adaptée à l'usage, adaptation aux conditions locales (type et lieu de l'exploitation, acceptation du risque et pratiques des agriculteurs, etc.) ;
- la fusion de données massives avec des données ponctuelles issues de sources variées, de traitement spécifique (SVM, *deep learning*), de partage de données (individuelles ou collectives) ;
- l'hybridation des approches « boîtes noires » (*data driven*) issues des méthodes d'intelligence artificielle, basées sur les données massives, avec les approches de modélisation plus mécanistes (*concept driven*) mais peu adaptées aux données en temps réel (*Ellis et al., 2020*). Cela implique des travaux sur l'explicabilité des approches « boîtes noires » et intégrant aussi ceux sur les systèmes à base de connaissances (ontologies).

Plus généralement, il est souhaitable que ces développements sur l'acquisition, la communication et les outils de traitement se fassent de façon intégrée et évolutive afin que le système complet soit en mesure de s'adapter dynamiquement à chaque profil de culture ou d'élevage, chaque taille d'exploitation, chaque stratégie appliquée par l'exploitant, ce qui pose un réel défi scientifique et méthodologique.

Les défis de la robotisation et les transformations du travail agricole du fait du numérique

Les outils numériques transforment le travail agricole. Comment les orienter positivement pour que le travail des agriculteurs, exploitants ou salariés, soit moins pénible et mieux valorisé ? La robotique pourrait être une manière de déplacer le travail humain sur des tâches à plus haute valeur ajoutée, mais de nombreux défis scientifiques et technologiques restent à relever dans les domaines suivants :

LA PERCEPTION ET L'INTERPRÉTATION DE SCÈNES DANS UN MILIEU DYNAMIQUE.

La perception et l'interprétation de scènes doivent être améliorées pour accroître la capacité de détection (fruit, feuille, maladie, etc.). L'apprentissage profond et encore plus l'apprentissage par renforcement sont des voies, d'autant que les robots, en embarquant des capteurs, généreront des données. Une alternative est d'exploiter l'expertise humaine dans la perception, ce qui questionne sur la coopération entre humain et robot. Enfin, il faut que les décisions prises par le robot soient explicables et interprétables et que le robot puisse se référer aux experts pour une détection ou une décision difficiles. Ceci implique de définir des critères de confiance sur la décision et d'explicitier les règles de décision issues de l'apprentissage, une thématique ouverte.

LES APPROCHES DÉCISIONNELLES AVANCÉES.

Actuellement, les robots sont cantonnés à un mode de fonctionnement unique et, pour réaliser des travaux complexes, les commutations entre plusieurs modes de commandes sont séquentielles et réalisées par une planification préalable. Des avancées significatives sont ainsi attendues dans le domaine de la reconnaissance de scènes et de situations (dynamique du robot, contexte d'évolution, contraintes agrienvironnementales...) empruntant aux techniques d'intelligence artificielle (*Hill et al., 2019*) pour moduler les fonctionnements. Ces problématiques dépassent le cadre strict de la navigation autonome pour s'appliquer aussi aux outils actifs afin qu'ils travaillent avec précision.

LA CONCEPTION DE NOUVEAUX OUTILS ACTIFS.

Aujourd'hui, l'innovation des robots agricoles est focalisée sur la navigation autonome, l'outil porté étant soit passif soit contrôlé de manière indépendante (*Wu et al., 2019*). Pour améliorer la répétabilité de l'intervention et accroître la vitesse d'exécution, des outils actifs à synchroniser avec le porteur mobile sont attendus, d'où des besoins de recherches sur la manipulation mobile et la coordination avec un porteur en mouvement.

L'INTERACTION HOMME-MACHINE ET L'AUTONOMIE PARTAGÉE.

En complément des questions de perception ou d'interface de communication, l'interaction entre humain et robot interroge l'autonomie et la collaboration : quand et comment redonner la main à un opérateur distant ? Comment un robot travaille-t-il en commun avec l'Homme ? En agriculture, la cobotique émerge commercialement avec les robots d'assistance (*Laneurit et al., 2016*) ou de portage de personne, et plus marginalement les exosquelettes – surtout passifs – pour faciliter le transport de charges. Des niveaux de collaboration plus complexes demanderont d'interpréter le comportement humain afin d'adapter les actions des

robots. Cette approche contribuera à populariser les robots qui ne remplaceront cependant pas toujours l'Homme, de même que l'on devra s'assurer de garantir la sûreté de fonctionnement de ces dispositifs.

LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT.

C'est un point crucial pour les engins autonomes intervenant en milieu ouvert. Des avancées scientifiques, technologiques et législatives sont nécessaires, en s'appuyant sur le véhicule autonome mais avec des difficultés liées au milieu naturel : (i) maintien de la précision du positionnement (pour éviter un obstacle ou ne pas écraser les cultures), (ii) garantie de navigation dans un espace prédéfini, (iii) maintien de l'intégrité vis-à-vis des risques de collision, de perte de stabilité ou de contrôlabilité. Des infrastructures et protocoles sont nécessaires pour valider la sécurité de fonctionnement et les autres performances (techniques, environnementales).

L'ADAPTATION À DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE PRODUCTION.

Les robots doivent être conçus dans une perspective de frugalité et d'inclusion : choix des matériaux et composants (minimisation de l'usage de terres rares), besoin énergétique limité, maintenance réduite, réparabilité, évolutivité et mise à jour des robots. De même, la robotique doit pouvoir apporter des solutions à toutes les agricultures, avec des niveaux de sophistication et d'autonomie adaptés aux systèmes de production. Les nouveaux systèmes de cultures, avec des mélanges d'espèces, voire l'introduction d'arbres (agroforesterie) poseront des problèmes de navigation.

De plus se posent des questions relevant des sciences humaines et sociale (SHS) sur la manière dont le numérique et la robotique transforment le travail, sur la perte d'autonomie (*deskilling*) due à l'usage de machines qui remplacent les gestes ou les raisonnements du praticien. Pour éviter ces risques, un des enjeux est d'intégrer, dès la phase de conception, les conditions d'utilisation, l'impact sur le travail et la satisfaction des agriculteurs (*Hansen et Straete, 2020 ; Vik et al., 2019*) et des autres catégories de travailleurs (salariés, associés, sous-traitants).

Modéliser pour intégrer les effets systémiques et construire des OAD utiles et utilisables

Les défis de recherche concernent plusieurs aspects de la construction des modèles et en particulier : la représentation et la compréhension des interactions, l'inclusion de la connaissance experte, la construction de modèles intégrés utiles aux agriculteurs, et la gestion de l'incertitude. Ils sont détaillés ci-dessous.

LA REPRÉSENTATION DE CES NOUVEAUX SYSTÈMES SOCIOAGROÉCOLOGIQUES

C'est un premier défi du fait que les systèmes agroécologiques sont beaucoup plus étendus (intégrant les chaînes de valeur) et beaucoup plus complexes (basés sur les interactions) qu'en agriculture conventionnelle. Les difficultés de modélisation sont liées aux choix des caractéristiques et grandeurs à intégrer (guidés par la capacité de mesure), à la variabilité naturelle de l'expression de ces caractéristiques, aux autres facteurs inhérents à la plante ou à l'animal, à l'environnement, au système de production ou d'élevage (prise en compte des autres individus de son groupe), au matériel d'intervention, et à la stratégie de l'agriculteur. On pourrait combiner des approches "data driven" (basées sur les statistiques, l'intelligence artificielle) et "concept driven" (modèles biologiques, économiques ou sociaux basés sur les mécanismes connus). On pourrait aller jusqu'à la création de véritables « jumeaux numériques » en intégrant les modèles développés pour les sous-systèmes, afin de tester des scénarios à l'échelle des systèmes (par exemple scénario de changement climatique, d'approvisionnement local massif...). Cette intégration n'est pas sans poser des problèmes d'alignement ⁷⁶ quand la correspondance de concepts entre sous-modèles ou entre jumeaux numériques et système étudié n'est pas assurée.

LE NIVEAU D'INTÉGRATION DE LA CONNAISSANCE EXPERTE.

Ce second défi à relever dans la construction d'outils d'aide à la décision (de type description, prédiction, prescription, cf. 4.2) génère des questions en SHS : doit-on aller jusqu'à la prescription ou se limiter aux étapes d'observation voire de diagnostic et laisser la décision (prescription) à l'arbitrage de l'agriculteur, comme suggéré par *Ingrand* (2018) en élevage de précision ? Concernant la gestion du risque, d'autres formalismes seraient actionnables, comme la théorie de la viabilité (*Aubin*, 1991) en principe adaptée mais qui présente des défis de recherche liés au fait que le modèle doit être de la forme générale d'un système dynamique contrôlé et contraint, de dimensions faibles (< 10) (*Brias*, 2016). Ceci ouvre des questions de recherche : que faire si le modèle n'est pas dynamique et contraint (modèle à compartiments, systèmes multiagents) voire est inconnu ? Comment utiliser les signaux faibles dans des séries temporelles (les points de basculement) ? Comment gérer le compromis entre complexité et contrôle (*Anderies et al.*, 2019) ? etc.

76. L'alignement consiste à indiquer qu'un concept, défini dans une ontologie, est sémantiquement identique à un autre concept, défini dans une autre ontologie, même si ces concepts ne portent pas le même nom.

LA CONSTRUCTION D'OAD UTILES AUX AGRICULTEURS

Cette utilité est au cœur du cahier des charges, et se traduit par plusieurs points d'attention que les recherches futures devraient intégrer :

- **l'interface utilisateur** : à la fois pour visualiser les sorties inférées, indispensables pour une bonne prise de décision, en particulier dans le cadre d'une optimisation multicritère (*Lepeniotti et al., 2020*) ou dans le cadre d'approches collectives (cf partie 6.2) mais aussi pour recueillir des données et pour connaître les objectifs stratégiques ou les préférences des agriculteurs et les intégrer dans les modèles de décision : visualisation des compromis, gamification (exemple du jeu sérieux numérique, *C-real game*). Il pourrait être pertinent d'explorer les IHM basés sur la communication orale, pour faciliter la saisie et la restitution de données et d'informations dans un contexte où l'agriculteur doit manipuler ;
- **la « personnalisation » des informations inférées** c'est-à-dire l'adaptation du modèle à la situation de la ferme ou de l'agriculteur, pour éviter l'uniformisation des prescriptions et pour être aligné sur la stratégie de l'agriculteur et prendre en compte ses objectifs (objectif de chiffre d'affaires, de revenu, mode de conduite...). Aujourd'hui les modèles de prescription sont issus de modèles de connaissance « large spectre » d'experts du domaine ; comment utiliser uniquement – ou prioritairement – les données collectées sur l'exploitation pour inférer des prescriptions plus conformes à l'exploitation et l'exploitant ? Ce verrou se traduit par des questions relatives à l'intégration des connaissances de l'agriculteur pour « personnaliser » les informations inférées et les rendre plus pertinentes par rapport à sa propre exploitation, non sans analogies avec la médecine personnalisée ;
- **la capacité à créer des modèles évolutifs** s'adaptant à un environnement changeant du fait de facteurs internes (stratégie) ou externes (environnementaux, réglementaires, économiques...). Cette question soulève celle de la mise à jour des modèles (*"concept drift"*) ;
- **la sécurité de la recommandation faite**, c'est-à-dire la garantie qu'elle ne conduise pas à une situation plus dégradée, surtout en contrôle automatique. Ce problème est dû à l'empilement des modèles et à la propagation des incertitudes (*Trnka et al., 2007*) et aux caractéristiques de l'actionneur, ce dernier point devant absolument faire partie du modèle pour que la décision soit pertinente (voir l'indice d'opportunité de *Tisseyre et Mc Bratney, 2008*).

L'INCERTITUDE ET SA PROPAGATION

L'incertitude est évoquée par 76 % des articles sur la modélisation (*Lepeniotti et al., 2020*) : comment la réduire, comment la caractériser (épistémique, ontologique, aléatoire), comment la représenter (*Caquet et al., 2020 ; Crespo et al., 2010 ; Groot et al., 2012*) ? Comment aborder les données incomplètes, bruitées,

et la subjectivité des connaissances humaines, en particulier dans la prescription (Lepenioti *et al.*, 2020 ? Quel compromis entre une modélisation trop complexe, ingérable et une modélisation simpliste peu pertinente (Caquet *et al.*, 2020) ? Explorer diverses voies de simplification des modèles serait très certainement utile (modèles stochastiques, mécanistico-stochastiques, métamodèles..).

Si on examine plus particulièrement les pays du Sud, dès sa conception, tout système d'aide à la décision devrait intégrer les caractéristiques des agricultures de ces pays : multifonctionnelles, avec une prévalence des raisonnements temporels, spatiaux et une forte incertitude. Les OAD et systèmes d'information associés devraient viser en priorité à : (i) favoriser la mise en place ou le maintien de pratiques agroécologiques et l'apprentissage collectif (collecte et échanges de savoir facilités par le numérique) ; (ii) mieux gérer les ressources (eau, matière organique), de la parcelle au territoire, et les récoltes (dates, quantités), (iii) construire des connaissances nouvelles à partir des données et des expertises, dans un contexte de données rares mais aussi du *big data* qui émerge (cf 6.5).

6.3 Transformer les relations entre acteurs dans les filières

Le rééquilibrage des filières pour une meilleure intégration des agriculteurs et des consommateurs est un besoin urgent pour répondre aux enjeux du maintien d'une agriculture familiale attractive et des attentes des consommateurs vis-à-vis de l'alimentation. En réponse aux verrous, les défis numériques ont été identifiés à l'amont comme à l'aval de la filière, en particulier sur trois points :

- le service : conseil, assurances ;
- la traçabilité ;
- la plate-formisation⁷⁷ et la reconfiguration des circuits de distribution.

Le service : conseil et assurance

Concernant le conseil, chacun des verrous identifiés au chapitre 4 (accès au numérique, individualisation des décisions et maintien de l'autonomie de décision, rapport de forces avec l'amont et l'aval) ouvre des perspectives de recherche sur le conseil et la digitalisation, dans les domaines des sciences du numérique ou des SHS, avec trois perspectives :

77. La plate-formisation est un modèle d'entreprise dans lequel une organisation, au moyen d'une plate-forme web, agit à titre d'intermédiaire entre particuliers plutôt qu'en tant que fournisseur de biens et de services. Pour en savoir plus : https://www.decideo.fr/Entreprise-3-0%C2%A0-vers-une-ineluctable-%C2%A0plateformisation%C2%A0-du-Business-de-l-IT_a9280.html

- **la construction d'OAD capables d'intégrer les caractéristiques techniques de l'exploitation (pédoclimatiques, techniques agronomiques, agroéquipements) et les préférences de l'exploitant.** Outre les éléments développés au 6.2, cette construction d'outils pourrait également s'appuyer sur une compréhension fine – à partir d'analyses agronomiques, sociologiques, gestionnaires et ergonomiques - du rôle des conseillers et des liens de confiance qu'ils tissent avec les agriculteurs, dans les profils d'utilisations des solutions numériques ;
- **la poursuite d'analyses économiques des modes de décision des agriculteurs et des dynamiques d'adoption d'innovations numériques,** dans un contexte marqué tant par la diversification des comportements d'agriculteurs en termes de recherche d'information que par la fragmentation de l'offre de services suite à la privatisation du conseil. Des recherches pourront aussi être menées pour identifier des modèles économiques durables d'un conseil digitalisé ;
- **l'analyse institutionnelle de la gouvernance de la numérisation de l'agriculture,** renvoyant à la question de la transparence de l'utilisation des données, à celle de la régulation des rapports de force et au contrôle du conseil comme acteur majeur du processus de digitalisation.

Concernant l'assurance (partie 4.2), des avancées techniques sont encore nécessaires pour réduire le risque de base de l'assurance indicielle ; on pourrait s'appuyer sur les nouveaux gisements de données (satellites, stations connectées..) ou des traitements appropriés (*De Leeuw et al., 2014 ; Ghahari et al., 2019*). Enfin, l'assurance « basée sur l'usage » – qui émerge dans le domaine de la mobilité (*Husnjak et al., 2015*) – est encore inconnue en agriculture mais pourrait être utilement explorée dans le cadre d'une agriculture connectée. Ces assurances « sur l'usage » pourraient-elles accompagner l'adoption des pratiques agroécologiques – plus délicates à mettre en œuvre avec le besoin d'une surveillance accrue mais plus résilientes en cas de choc sanitaire ou climatique – en garantissant le revenu sous réserve que les cultures ou les troupeaux aient été correctement suivis et que les recommandations des OAD aient été appliquées ? Ces questions doivent être abordées dans des approches pluridisciplinaires.

Traçabilité, transparence de toute la chaîne, vie des données

Comme montré dans la partie 4.3, dans le contexte actuel, la traçabilité des flux et produits agricoles présente une importance capitale afin d'instaurer la confiance entre les agriculteurs et les consommateurs. Par exemple, la *blockchain* génère un intérêt croissant pour partager toute la vie d'un produit, en permettant par la même occasion de réduire les fraudes. Mais de nombreux défis sont à relever dans le domaine de la gestion technique et institutionnelle des données, en particulier liés à la traçabilité au sens large des pratiques et des produits.

LES DÉFIS TECHNIQUES DE LA BLOCKCHAIN

Comment adapter les *blockchains* actuelles, qui ont été conçues pour des informations bancaires, à ce nouveau type de données, en lien avec un flux de produits souvent périssables, pour les suivre et les archiver efficacement sans violer les principes de base de stockage des données d'une *blockchain* ? Comment le flux d'information qui caractérise la traçabilité dans les *blockchains* peut-il être incontestablement lié au flux de produits ? Comment abaisser les coûts des systèmes d'identification et qui doit les supporter alors qu'ils bénéficient à toute la chaîne ? Comment assurer la sécurité des données dans un écosystème où les sources de données se multiplient⁷⁸ ? Également, comme évoqué dans le chapitre 3, les *blockchains* publiques sont très consommatrices d'énergie (car la validation des informations, pour être « incontestable », est ouverte à un grand nombre de participants « en compétition virtuelle », les « mineurs », ce qui se traduit par un grand nombre de calculs en parallèle) et on pourra leur préférer une *blockchain* privée, de consommation plus faible (car basée sur un nombre restreint de participants autorisés) et également plus adaptée aux applications agricoles. Mais ces dernières soulèvent le problème de gouvernance des *blockchains*.

LE STOCKAGE DES DONNÉES ISSUES DE LA CHAÎNE AGRICOLE ET ALIMENTAIRE

Ces données peuvent être dites industrielles car elles concernent la production agricole mais aussi les industries amont et aval. Doit-on les stocker dans des entrepôts spécifiques ou de manière distribuée ? Comment garantir la souveraineté des données ? Certains opérateurs doivent-ils être évités du fait du *Cloud Act*⁷⁹ ?

L'INTÉGRATION DES DONNÉES

C'est un élément important pour faciliter une utilisation analytique ultérieure. Du fait de l'augmentation importante du volume des données, du besoin de vérifier leur qualité, et de la valeur de l'information, des systèmes capables de permettre l'accès à une information pertinente et fiable vont devenir des sources de valeur. Il s'agit de faire vérifier et de faire dialoguer les systèmes d'information de l'entreprise – tels que ERP (*Enterprise Resource Planning*), CRM (*Customer Relationship Management*) – avec les données générées par les objets connectés et gérées via l'Internet des objets (IoT). Il s'agit aussi d'évaluer et de reconnaître

78. Livre blanc du *National Institute of Standard and Technology* américain qui répertorie les problèmes de sécurité de l'internet des objets (IoT), publié en Oct 2018 (<https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Publications/white-paper/2018/10/17/iot-trust-concerns-draft/documents/iot-trust-concerns-draft.pdf>)

79. Le "*Claryfying Lawful Overseas Use of Data Act*" ("*CLOUD Act*"^{162(*)}) a été adopté par le congrès des États-Unis d'Amérique en mars 2018 : Il vise principalement à réaffirmer le droit dont disposent les autorités américaines d'exiger des intermédiaires techniques soumis à leur juridiction la communication de toutes données stockées, même à l'étranger. Il prévoit aussi, et indépendamment, la conclusion d'accords bilatéraux spécifiques et réciproques avec les États-Unis en la matière. (<https://www.senat.fr/rap/r19-007-1/r19-007-13.html>)

la valeur créée par chacun dans toute la chaîne de production et de traitement de la donnée, avec les questions suivantes : quelles voies pour mieux valoriser les données dans les chaînes de valeur, en particulier auprès des consommateurs ? Comment peuvent-elles mieux rendre compte des transitions vertueuses de l'agriculture auprès des consommateurs ?

LA GOUVERNANCE DES BLOCKCHAINS

Les défis consistent à concevoir un système sécurisé et égalitaire impliquant l'ensemble des acteurs de façon équitable, sans qu'aucun acteur n'impose sa vision aux autres ou ne s'approprie l'usage des données. De nombreuses questions doivent être abordées : comment les données générées doivent-elles être partagées ? Que construire en termes de gouvernance des données ? En quoi l'accessibilité de l'information aura-t-elle un impact sur l'amélioration de la gouvernance de la chaîne d'approvisionnement (*Gardner et al., 2019*) et sur les changements de pouvoirs dans les chaînes de valeur ? Quel effet le numérique aura-t-il sur les liens de confiance et les modalités de partage de valeur au sein de la filière (*Jakku et al., 2019*) ? Comment éviter que la valeur créée soit uniquement captée par les géants du numérique (*ANRT, 2018*) ? Existe-t-il un risque que le numérique renforce les rapports de force existants (*Bronson et Knezevic, 2016 ; Carolan, 2017, 2018 ; Wolf et Buttel, 1996*).

Plate-formisation et reconfiguration des circuits

Les plates-formes, nouveaux espaces virtuels de rencontre, contribuent à changer le modèle économique dans l'agriculture, facilitent les échanges et les dynamiques collectives. La saisie automatique de données en agriculture, l'hyperconnectivité, l'Internet des objets et l'automatisation produisent des informations en temps réel pour optimiser le fonctionnement de la chaîne de valeur, acteur par acteur, ou globalement. Cette informatisation croissante accroît les capacités d'agilité des circuits de transformation ou de commercialisation. Il s'agit de mettre en place une planification agile de la production agricole et alimentaire pour répondre à la demande croissante d'approvisionnement local des villes et de la restauration collective. Si on souhaite promouvoir une agriculture familiale pour nourrir les villes et la restauration collective, des défis majeurs portent sur la planification de la production, la coordination entre acteurs de la chaîne d'approvisionnement et sur la logistique pour répondre aux attentes de tous et être résiliente aux chocs (comme démontré dans la crise Covid-19). Ces trois points sont détaillés ci-dessous.

En agriculture, la planification de la production est une réalité chez les agriculteurs travaillant sous contrat pour des industries agroalimentaires, en particulier dans les légumes surgelés, en conserves ou de 4^e gamme (Ahumada et al., 2012 ; Li et al., 2015). Les défis portent maintenant sur la planification de la production de produits frais pour garantir l'approvisionnement de la restauration collective, en intégrant les incertitudes (météo, sanitaires, sociales...) et pour prendre en compte la demande (Balaji Prabhu et Dakshayini, 2020).

Une réponse à la question de la coordination des acteurs est la création des "food hubs", des modèles commerciaux innovants qui permettent de répondre à la demande du commerce de gros en coordonnant des petits producteurs (Berti et Mulligan, 2016). Les "food hubs" les plus intégrés sont des organisations intermédiaires qui utilisent Internet pour les transactions commerciales et qui gèrent l'agrégation, la distribution et la commercialisation des produits alimentaires de la source (des petits producteurs locaux et régionaux) aux clients (particuliers ou acheteurs en gros). Ces agrégateurs devront disposer de modèles de la chaîne de production et de distribution incluant des caractéristiques réalistes, telles que des informations incertaines, l'intégration logistique, la modélisation des risques, l'environnement réglementaire, la qualité et la sécurité des produits. La modélisation stochastique pourrait être utile dans ce cadre (Ahumada et Villalobos, 2009).

Construire des réseaux logistiques de distribution urbaine pour une production périurbaine avec un raccourcissement des circuits commerciaux implique d'améliorer la gestion d'inventaire et la planification de la distribution (en particulier en froid) pour réduire le gaspillage alimentaire et l'empreinte carbone associée. La recherche en planification appliquée aux chaînes d'approvisionnement alimentaire est encore peu développée par rapport à l'industrie et en particulier, il y a un manque flagrant de modèles adéquats pour la planification des décisions opérationnelles pour la production, la récolte et la distribution des produits agricoles frais (Ahumada et Villalobos, 2009). La dimension environnementale devrait y être intégrée (Melkonyan et al., 2020).

Dans les pays du Sud, les défis liés à l'amélioration de l'approvisionnement dans les circuits de commercialisation locaux sont encore plus vifs : il s'agit de réduire les pertes post-récoltes par l'aide à l'organisation et une meilleure gestion logistique (modélisation et optimisation des circuits, logistique du froid). Pour les circuits longs, sont attendus des dispositifs de traçabilité frugaux et garantis, pour les filières nationales et internationales.

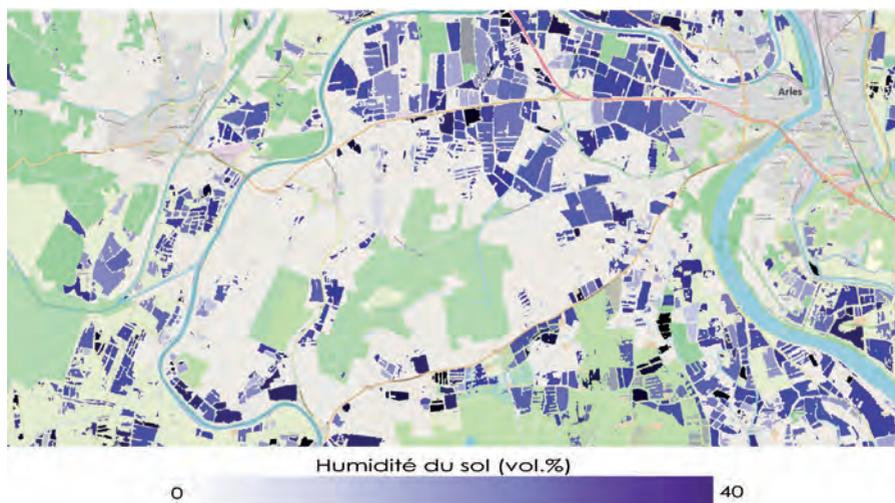
Enfin, une des perspectives est l'évolution vers une alimentation personnalisée. Svetlin et al. (2016) proposent une coconception « en ligne » et individualisée de produits, via l'analyse linguistique des préférences du consommateur et la traduction en paramètres de formulation (appliqué à une boisson à l'orange). Ce type de démarche pourrait se diffuser à des aliments plus complexes produits en fonction des besoins, des restrictions, du budget et des goûts de chacun, et livrés tout préparés au domicile (Académie des technologies, 2021). La connexion avec les applications de suivi personnalisé de la santé en serait aussi facilitée.

6.4 Créer et partager des données et des connaissances

Données et connaissances sont au cœur d'un numérique qui doit être construit pour favoriser l'agroécologie : les données alimentent la connaissance et la connaissance alimente l'agroécologie. Ces capitaux informationnels sont à l'origine de nouveaux défis technologiques, réglementaires, organisationnels et institutionnels. Ces défis portent sur l'origine, la qualité (*crowdsourcing*) et la gouvernance des données, mais aussi sur la formalisation et le partage de la connaissance, des défis auxquels il est important de répondre pour la construction d'une agriculture numérique éthique.

LES DONNÉES PARTICIPATIVES (CROWDSOURCING)

Avec le développement de la connectivité et des systèmes d'acquisition (*smartphones*, agriculture de précision, objets connectés...), la collecte de données par des praticiens (agriculteurs, conseillers) ou des profanes (citoyens) se développe et complète les approches plus classiques de recueil de données expérimentales par des scientifiques. Ces démarches de collecte participative de données à vocation de documentation environnementale ou de recherche (4.4) génèrent tout d'abord des défis techniques : quelles infrastructures pour gérer et échanger ces données participatives ? Comment assurer la qualité des données collectées par *crowdsourcing* ? Comment tracer les données produites pour un partage équitable de la propriété intellectuelle ? Les questions de recherche relèvent aussi des SHS et des sciences économiques : quelles conditions sont-elles nécessaires pour que les agriculteurs soient enclins à partager leurs données et informations dans des relations de confiance avec leur environnement de conseil et de formation (Sutherland et al., 2013 ; Wiseman et al., 2019) ? Comment attribuer une valeur à ces données produites ? Quel impact ces nouveaux rôles de collecteurs de données auront-ils sur l'évolution du métier d'agriculteur ?



Cartographie infra-parcellaire et hebdomadaire de l'humidité des sols réalisée par télédétection à base d'images Sentinel 1 et 2. © Theia et INRAE.

LA GOUVERNANCE ET LE PARTAGE DES DONNÉES ET DES CONNAISSANCES

On a vu que lorsqu'on aborde les territoires ou les filières, les données sont de plus en plus issues de multiples acteurs (données multisources). Les données étant générées par des acteurs distincts, via des systèmes différents, et hébergées potentiellement sur plusieurs sites, il conviendrait de définir quels sont les droits d'usage des données avec des besoins parfois contradictoires entre le partage des données et la protection de celles-ci (collaborer tout en restant compétitif). Quelles modalités de gouvernance privilégier, dans un contexte marqué par des investissements importants de firmes du numérique et de l'amont dans la gestion des données sur les risques agricoles et par une digitalisation des systèmes d'innovation agricole (Fielke et al., 2019) ? Dans les filières, il s'agit de comprendre le rôle que joue l'information dans l'émergence de comportements de coopération et de conformité entre les acteurs de différents secteurs et à différents niveaux des chaînes d'approvisionnement mondiales (Gardner et al., 2019). Comment favoriser la circulation « vertueuse et sécurisée » de la donnée et la souveraineté des États⁸⁰ ?

80. L'académie des Technologies préconise la « mise en place au niveau européen d'une labellisation des solutions de circulation qui garantisse leur caractère vertueux et sécurisé » et « souligne l'importance du développement de solutions de fédération de clouds européens ». Voir <https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/publications-de-l-academie/posts/pour-une-circulation-vertueuse-des-donnees-numeriques>

Évidemment, ces questions sur la gouvernance des données et les risques de prise de pouvoir par certains acteurs des filières (agrofourriture, aval) ou par les entreprises du numérique qui maîtrisent l'intelligence artificielle et les réseaux se posent de manière encore plus aiguë dans les pays du Sud, moins régulés.

FORMALISATION ET PARTAGE DES CONNAISSANCES

Le numérique favorise la coconstruction (participation) et l'échange de savoirs, mais les défis sont encore nombreux : comment construire des savoirs intégrant les usages et savoirs des agriculteurs (recueil d'expertise, contextualisation), afin de favoriser leur adoption ? Comment construire une gouvernance satisfaisante, non seulement des données mais aussi des savoirs générés par ces données ? Comment accélérer la construction de communs numériques pour pérenniser les savoirs, en particulier pour les comparer et les agréger, ce qui génère des questions non triviales de recueil de l'expertise et d'ontologies ? Notamment, comment rendre compatibles (emboîtables, associables) des ontologies construites sur des principes différents : usages différents, auteurs différents, ontologies fondationnelles différentes etc. ? Enfin, dans un souci de frugalité et d'efficacité impliquant d'éviter de multiplier les outils et d'utiliser au mieux les ressources existantes, est-il pertinent de mobiliser les plates-formes et réseaux sociaux généralistes pour les échanges de savoir, et si oui, comment le faire ?

Dans les pays du Sud, un défi consiste à renouveler, avec le numérique, les approches participatives pour l'apprentissage collectif et la co-innovation – au travers d'une interdisciplinarité « augmentée » (psychologie cognitive, ergonomie, jeux sérieux immersifs, *design thinking* et sciences de gestion) – et d'évaluer leur impact (*Tesfaye et al., 2019*). Il s'agit aussi de faciliter la communication avec les agriculteurs et entre agriculteurs, dans un contexte de faible couverture réseau, de pluralité des langues et dialectes (voir 4.5).

Conclusion

Au regard des risques et enjeux précédemment évoqués, les défis identifiés dans ce chapitre sont à considérer dans un contexte général commun, qui permet de construire un cadre avec plusieurs facettes :

- **Le besoin d'une vision systémique pour l'agriculture et le numérique.** Les systèmes et filières agricoles sont des systèmes complexes, intégrant de nombreux éléments et acteurs en interaction à différentes échelles (exploitation, territoire, filière, etc.). Les développements numériques à prévoir doivent ainsi être pensés et évalués à la lumière de leurs effets directs à leur échelle d'application mais aussi de leurs effets indirects dans l'ensemble du système et de la société, en termes biotechniques, économiques, sociaux (p. ex. travail), environnementaux (biodiversité, ressources), éthiques. Considérer ces impacts indirects et développer des méthodes permettant de les évaluer est indispensable pour être capable, entre autres, de s'assurer que les coûts énergétiques globaux sont bien en dessous des bénéfices que le développement d'une technologie prodigue, donc sans risque d'augmentation de la complexité (cf 5.4). Développer des approches systémiques est de plus indispensable pour anticiper des rétroactions, comme par exemple les effets rebonds⁸¹ particulièrement présents avec les technologies numériques. La recherche est ici confrontée à des difficultés méthodologiques et conceptuelles majeures, se situant principalement au niveau de l'analyse systémique même des problèmes. Les approches doivent être fondamentalement transdisciplinaires, certains cadres comme le concept de « pensée complexe » introduit par Edgar Morin pouvant aider (Morin, 2014).
- **La recherche de la frugalité.** Elle consiste à réduire les dépenses énergétiques, la consommation des autres ressources (renouvelables ou non renouvelables) et les pollutions engendrées par l'usage des technologies. Elle doit intégrer toutes les étapes de la chaîne de la donnée, de la captation à la restitution et la décision, en passant par sa collecte. Le développement de solutions numériques doit ainsi être pensé en termes de coûts, que ce soit de matériel (par exemple composants utilisés, taille, nombre, notamment pour les capteurs, de la robotique), de données produites (nature, nombre, stockage) ou de puissance de calcul nécessaires afin d'être économes vis-à-vis des ressources naturelles (eau, minéraux) et de l'énergie. Ces analyses doivent prendre en

81. L'amélioration de l'efficacité de technologies aboutit souvent à une augmentation de la consommation de la ressource visant à être préservée, à cause des changements de comportement des consommateurs ; voir <https://ecoinfo.cnrs.fr/2015/12/23/les-effets-rebond-du-numerique/>

compte le cycle de vie complet des matériels utilisés (extraction des ressources, fabrication, transport, usage, fin de vie). Si le numérique revendique de réduire l'usage d'intrants agricoles et d'économiser des ressources (comme par exemple l'eau), il sera néanmoins indispensable d'intégrer son impact environnemental dans le calcul de l'empreinte environnementale globale de la nouvelle pratique agricole. Cela amène aussi à faire preuve de sobriété et de prudence dans le développement et la montée à l'échelle de solutions technologiques notamment en envisageant préalablement des solutions et alternatives d'ordres organisationnel et sociopolitique ne nécessitant pas directement l'usage de ressources et l'émission de pollutions.

- **La recherche de la résilience.** L'optimisation de la production et des filières en termes de coûts économiques a orienté plusieurs décennies d'innovations technologiques et a mené à la spécialisation, la réduction des stocks, la réduction des marges de manœuvre et de l'autonomie des différents acteurs. Ceci a abouti à une réduction de la résilience des systèmes et filières agricoles, c'est-à-dire leur capacité à résister et à s'adapter, à différentes échelles, à des chocs exogènes comme les aléas climatiques, les pénuries de ressources et ruptures de chaînes logistiques, les crises économiques ou sanitaires (*Biggs et al.*, 2015). Les solutions numériques doivent s'attacher à favoriser cette résilience, en étant l'élément d'un système complexe qui s'appuie par exemple sur les sept principes de la résilience de *Biggs et al.* (2015)⁸², et qui évite le piège d'une complexité induisant des dépendances techniques ou sociales ou des risques de sécurité (des données, de fonctionnement), facteurs de fragilisation.
- **La cybersécurité.** Bien que non spécifique à l'agriculture, ce sujet n'en est pas moins crucial en agriculture car il touche à la souveraineté alimentaire. Il concerne aussi bien la sécurisation de la continuité de la production et de la distribution agricole et alimentaire que la sécurité des informations relatives à la production agricole. La cybersécurité a été largement traitée dans un précédent livre blanc (*Inria*, 2019). L'Union européenne soutient le projet GAIA-X (www.data-infrastructure.eu) qui vise à développer une infrastructure autonome et souveraine des données respectant les standards européens, notamment *via* un réseau de *clouds* fédérés. Un des thèmes identifiés de GAIA-X est l'agriculture.

82. https://whatisresilience.org/wp-content/uploads/2016/04/Applying_resilience_thinking_FR_aktiv.pdf

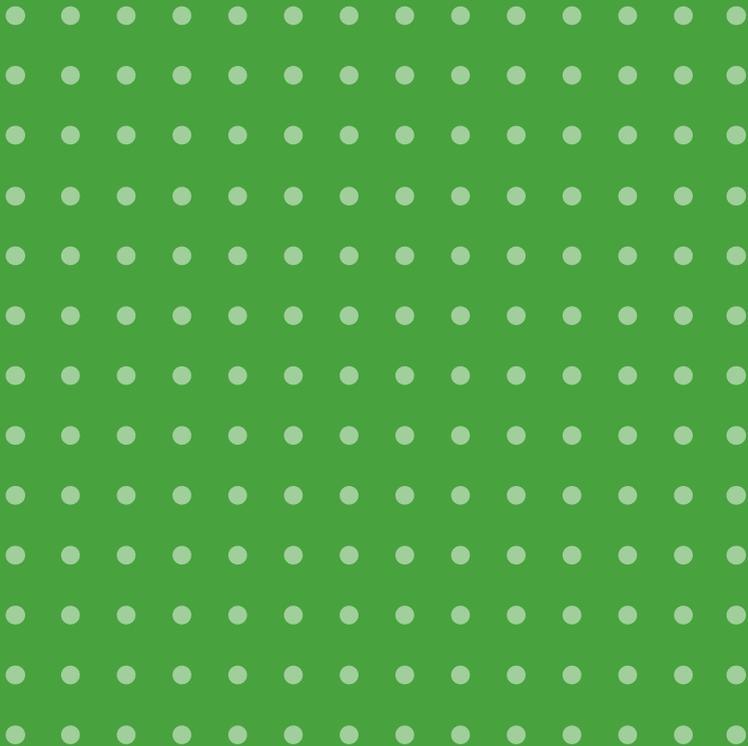
La prise en compte de ces différents éléments amène à promouvoir un numérique responsable, pertinent et partagé, pour des systèmes alimentaires durables notamment dans le cadre de la transition agroécologique⁸³. Prendre ce cap oriente doublement les recherches, d'une part dans le choix des sujets de recherche – identifiés dans ce chapitre – mais aussi dans la posture de recherche. Nous recommandons *a minima* de s'appuyer sur des démarches de type recherche et innovation responsable ou RRI (*Stilgoe et al., 2013*). Encore peu appliquée en agriculture numérique, la RRI repose sur les principes suivants : anticipation (que se passera-t-il si... quels impacts positifs et négatifs), réflexivité (quel sens donnons-nous au numérique responsable, quelles sont les limites de nos hypothèses, choix, connaissances), inclusion (avec qui et pour qui, avec quelles valeurs) et réactivité (comment ajuster la trajectoire de développement en réponse à l'évolution des conditions). Elle s'appuie sur une recherche transdisciplinaire. Construire les technologies de l'agriculture numérique dans un cadre de RRI aiderait ainsi à répondre aux défis identifiés tout en prenant en compte le contexte global et des considérations sur la nécessaire intégration d'une vision systémique et des notions de frugalité, de sécurité et de résilience.

Définition

Le concept de RRI (Recherche et Innovation Responsable) introduit dans les années 2010 (*Owen et al., 2012 ; Pellé et Reber, 2015 ; Stilgoe et al., 2013*) est caractérisé par quatre dimensions-clés, « anticipation, réflexivité, inclusion et réactivité » qui devraient toutes être mises en œuvre tout au long du processus de recherche et d'innovation (*Stilgoe et al., 2013*). Les travaux sur la RRI sont encore limités en agriculture et ils ne portent pas spécifiquement sur l'agriculture numérique. Néanmoins, depuis la fin des années 2010, *Klerkx et Rose (2020)* notent un intérêt croissant pour la RRI en agriculture 4.0 (*Bronson, 2019 ; Eastwood et al., 2019 ; Rose et Chilvers, 2018*).

83. Responsable : équitable, inclusif, frugal (empreinte environnementale), au service d'une nécessaire diversification des cultures, des pratiques et des produits dans un contexte de réduction d'intrants, assurant une appropriation d'une diversité d'acteurs. Pertinent : répondant à des besoins effectifs, proposant des solutions efficaces et acceptables, préservant diversités et libertés. Partagé : où l'utilisateur peut valoriser son expertise, ses données locales, donner son avis sur des sorties (ce qui les suppose explicites et bien communiquées, avec une incertitude estimée), agir sur les paramètres des outils en restant dans un cadre plausible.

Conclusion



L'évolution des systèmes alimentaires et de l'agriculture est un des grands challenges des années à venir. En effet, comme détaillé dans cet ouvrage, l'agriculture affronte déjà et va devoir affronter dans le futur de grands défis que sont notamment la sécurité alimentaire pour nourrir la population planétaire dans des conditions écologiques et climatiques dégradées (changement climatique, érosion de la biodiversité, perte de fertilité des sols), l'évolution des modèles agricoles *via* la transition agroécologique pour une réduction des impacts environnementaux, une diversification des systèmes de production, une inscription plus grande dans les territoires, la souveraineté alimentaire...

Challenges de recherche

La révolution numérique est en cours dans de nombreux domaines et l'agriculture numérique en est une composante et une conséquence. Nous avons présenté dans cet ouvrage quels sont les travaux actuels sur les technologies numériques aidant à s'attaquer aux enjeux de l'agriculture : autour de la donnée (de son acquisition à son stockage), en modélisation, en apprentissage et extraction des connaissances, en ingénierie des connaissances pour l'aide à la décision ou encore en automatisation et robotique. Nous avons également décrit les nombreuses opportunités offertes par l'utilisation du numérique en agriculture pour mieux produire, en privilégiant l'agroécologie et en s'adaptant aux changements exogènes, mieux s'inscrire dans les chaînes de valeur et mieux partager, apprendre et comprendre. Les travaux actuels ne répondent cependant qu'à une partie des opportunités relevées. De plus, si le potentiel d'encapacitation (*empowerment*) de ces technologies est important, les risques associés le sont aussi, tels que de rater la transition agro-écologique, renforcer les inégalités et rapports de forces, perdre en souveraineté ou augmenter la complexité de façon excessive. Au regard de ces opportunités, de ces risques et de l'état des travaux existants, nous avons tenté de montrer les défis principaux à relever pour une montée en puissance durable et responsable de l'agriculture numérique, favorisant l'agroécologie, l'adaptation au changement climatique et les chaînes de valeur rééquilibrées et reterritorisées.

Parmi les nombreux défis cités dans ce livre, quelques-uns nous paraissent particulièrement importants et propices à être traités conjointement par INRAE et Inria :

- En termes de données, quelles sont les plus pertinentes à acquérir aux différentes échelles (végétal, animal, parcelle, troupeau, exploitation, territoire...)? Comment les acquérir et les transmettre à moindre coût énergétique et avec des garanties d'accès et de propriété (*privacy*)? L'hétérogénéité des données est inhérente à la multiplication des systèmes. Il s'agit de tirer parti de cette hétérogénéité

qui procure le bénéfice de la redondance et de la complémentarité, facteurs d'amélioration des résultats de mesure.

- Pour l'aide aux agriculteurs : quelles connaissances est-il nécessaire de créer, comment utiliser et analyser au mieux les données pour découvrir ces connaissances, comment combiner de nouvelles connaissances avec celles déjà existantes ? Comment restituer les informations aux agriculteurs (visualisation) ? Comment les aider à prendre des décisions *via* des outils de diagnostic ou d'aide à la décision ? Quelle robotique développer pour favoriser le passage à l'échelle de l'agroécologie ? Pour cela il est important que les acteurs du numérique et du monde agricole conçoivent conjointement ces nouvelles solutions.
- L'incertitude est inhérente aux processus biologiques, climatiques, météorologiques, etc., en particulier dans les systèmes de production agricole appliquant une démarche agroécologique. Comment modéliser la complexité par associations de modèles (notion de jumeaux numériques) tout en maîtrisant la propagation de l'incertitude ? Comment l'intégrer dans les modèles et la restituer pour une prise de décision éclairée ? La gestion de cette incertitude demande une expertise combinée des disciplines de compréhension de l'objet observé (soit, selon l'échelle, biologie, physiologie, agronomie, ingénierie territoriale, etc.) et des sciences mathématiques et informatiques.
- La participation se révèle un levier efficace de la transition agroécologique et de la transformation des systèmes alimentaires : collecte de données, médiation, gouvernance, partage d'expériences. Il s'agit de mettre le numérique au service des processus participatifs : *crowdsourcing*, modèles d'accompagnement, objets de médiation ou frontières, partage, gestion et intégration (avec d'autres systèmes) de données et de connaissances.
- La traçabilité, la transparence, et plus largement la documentation du produit, tout au long de la chaîne de production, deviennent des éléments majeurs des systèmes agroalimentaires et nécessitent de considérer quelles données « tracer », documenter, diffuser (en particulier concernant les denrées périssables) et comment choisir les bons outils de stockage et transmission (par exemple la *blockchain*).
- La cybersécurité est cruciale pour la souveraineté alimentaire en termes de sécurisation de la production agricole et des informations produites et qui y sont liées.

Enfin, il est important de rappeler qu'il y a plusieurs modèles d'agriculture et qu'il y aura demain encore plus de diversité (voir prospective du JRC⁸⁴ ou du CSIRO⁸⁵) ce qui amènera à développer « des numériques » adaptés à chaque modèle.

84. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC122308/farmers_of_the_future_final_online.pdf

85. <https://research.csiro.au/digiscape/digiscapes-social-dimensions-project-what-did-we-learn/>

Recommandations

Pour terminer cet ouvrage, nous proposons quelques recommandations de recherches et travaux qui nous semblent importants pour le futur du numérique en agriculture.

Au vu des grands enjeux déjà cités et auxquels est et sera confrontée l'agriculture, le numérique peut donc être un levier majeur pour permettre à notre agriculture d'y répondre en favorisant la transition agroécologique et la transition des systèmes alimentaires. Mais le numérique, on l'a vu, est aussi porteur de risques, en termes environnementaux et humains (coût sur les ressources, déshumanisation de l'agriculture, renforcement des inégalités). C'est pourquoi, il est essentiel de les prendre en compte dans les futures recherches pour lesquelles nous recommandons les grands principes suivants : i) adopter une vision systémique en considérant le système global et la complexité des systèmes agricoles et alimentaires ; ii) prôner la frugalité pour que l'apport des technologies numériques ne se fasse pas au prix par exemple d'une consommation énergétique importante, détériorant le bilan global ; iii) favoriser la résilience c'est-à-dire la capacité des systèmes agricoles aidés du numérique à résister aux chocs et à s'adapter à de multiples changements (climat, économie, sanitaire, méthodes de travail...) ; iv) s'appuyer sur la diversité des systèmes agricoles, avec un numérique au service de l'agriculture dans toutes ses formes. Pour cela nous recommandons d'appliquer des démarches de recherche et d'innovation responsable ou RRI (voir chapitre 6). Enfin, la vision systémique et la complexité des objets d'études à considérer nécessitent d'éviter que les recherches ne soient trop sectorielles pour aborder pleinement les questions soulevées (cf. chapitre 5). Il est donc important de mobiliser au mieux l'interdisciplinarité et la science participative dans nos recherches sur le numérique dans l'agriculture et donc insister sur l'importance de valoriser ce genre de démarches et de recherches dans nos instituts.

Nous n'avons pas la prétention de définir un chemin exact à suivre, mais au vu du panorama large que nous avons dessiné tout au long du document, nous estimons que quelques thèmes et principes forts se dégagent et peuvent éclairer les décisions à venir. Comme indiqué dès le départ de l'ouvrage, notre parti pris est que l'agriculture doit évoluer vers l'agroécologie et les systèmes alimentaires durables, et que le numérique pourrait être un outil puissant au service de cette transition dès lors que l'on prend garde à certains écueils. Les recommandations se fondent sur ce parti pris.

Sujets de recherche

Dans les sujets de recherche déjà rappelés plus haut, l'un des points qui nous semblent le plus important est que **l'agroécologie va nécessiter la production d'une grande quantité de nouvelles connaissances**. La production de ces connaissances passera très probablement par des approches numériques : collecte de données à large échelle mais aussi *monitoring* de nouveaux indicateurs (ex : biodiversité intra et interspèce caractérisée par des données génomiques), gestion de ces grandes quantités de données, extraction de connaissances à partir des données nouvelles et inédites à toutes les échelles (du microbiote à l'image satellitaire). Plusieurs points distinguent ces travaux de la « science des données » généraliste :

1) les approches choisies devront intégrer les contextes locaux de territoire/exploitation, en particulier en permettant la prise en compte des connaissances existantes et l'agrégation et la pérennisation des connaissances expertes de l'exploitant ;

2) la production de ces données (mesurées ou simulées) devient un enjeu et avec elle, les questions de qualité des données produites, de prétraitement et de partage. La convergence des données de phénotypage – qui plus est en milieu réel – avec des données génomiques devrait accélérer la création de connaissances sur les processus en agroécologie, la sélection de variétés ou la construction d'itinéraires culturels nouveaux pour anticiper le changement climatique. Un deuxième point d'étude important sera les **outils numériques d'assistance aux agriculteurs, conseillers et aux autres acteurs de la filière ou des territoires**. Cela concerne d'une part les OAD (Outils d'aide à la décision), qui seront l'interface privilégiée pour mettre en œuvre les connaissances, en particulier évoquées ci-dessus. Au cœur du dialogue entre l'acteur humain et les modèles numériques, ces outils nécessiteront des recherches particulières s'appuyant sur les sciences du design, la visualisation, l'ergonomie pour faciliter leur adoption. La prise en compte des spécificités locales et des choix de conduite technique de l'exploitant/des choix politiques du territoire est essentielle pour éviter d'aller vers une uniformisation de l'agriculture. Les approches étudiées devront pouvoir expliquer/justifier leurs préconisations, afin de permettre un dialogue constructif avec les acteurs humains. D'autre part, de nouvelles solutions robotiques d'assistance sont à inventer, afin de soulager les agriculteurs des tâches les plus pénibles et/ou dangereuses. Au-delà des questions de recherches sur la navigation en milieu non contrôlé, la sécurité, et le couplage outil – porteur robotisé, la coconception participative de ces solutions robotiques nous semble être une voie prometteuse pour réduire la tension technologie/écologie.

Un troisième pôle de recherche en informatique est motivé par le fait que les processus de l'agroécologie – au sens large – s'étendent au-delà de l'exploitation, à savoir dans les chaînes de valeur et dans les territoires. Dans ces domaines, les recherches à privilégier appellent la **recherche opérationnelle sur des questions de planification** (dans le temps et l'espace) de l'usage des ressources (eau, terres) et de la production agricole (comment alimenter massivement à partir de sources désagrégées ?).

Enfin, comme dans tous les systèmes numériques exposés, la question de la **cybersécurité** est incontournable. Dans le domaine de l'agriculture elle doit prendre plusieurs formes. Il s'agit en effet de sécuriser les données elles-mêmes mais également les systèmes matériels qui les génèrent, les réseaux qui les transportent ainsi que les outils qui les exploitent afin qu'aucun ne soit détourné (interception des données, injection de fausses données). Une voie d'exploration serait de combiner les systèmes de sécurité « classique » avec de nouvelles techniques d'apprentissage spécifiques aux données agricoles permettant d'identifier, d'isoler des nœuds malicieux et/ou de détecter des fuites d'information.

Forme de la recherche

Nous recommandons d'appliquer des **démarches de recherche et d'innovation responsable** ou RRI (voir la fin du chapitre 6). Pour aborder pleinement la complexité des objets d'études, il faut éviter que les recherches ne soient trop sectorielles (cf. chapitre 5), ce qui implique de développer une vision systémique. Il est donc important de mobiliser au mieux l'interdisciplinarité et la science participative dans nos recherches sur le numérique dans l'agriculture et d'insister sur l'importance de valoriser ce genre de démarches et de recherches dans nos instituts.

Cette vision systémique peut aussi nous aider à aborder la question du bilan environnemental des solutions numériques. En effet, les pistes de recherches évoquées ci-dessus peuvent être abordées de multiples manières, certaines d'entre elles impliquant de grandes consommations d'énergies et de ressources rares. Afin d'éviter cet écueil, nous recommandons que les approches choisies soient **frugales** : l'apport des technologies numériques ne doit pas se faire au prix d'une consommation énergétique importante détériorant le bilan global. Pour établir ce bilan, il est souhaitable d'aller vers une **vision systémique** en considérant le système global et la complexité des systèmes agricoles et alimentaires (plutôt que d'optimiser un seul indicateur).

Il nous semble aussi critique que les futures recherches mettent également l'accent sur la **résilience** c'est-à-dire la capacité des systèmes agricoles aidés du numérique à résister aux chocs et à s'adapter à de multiples changements (climat, économie, sanitaire, méthodes de travail...). Enfin, sachant qu'il n'existe pas *une* mais *des* agricultures, il faudra s'appuyer sur la diversité des systèmes agricoles, avec **un numérique au service de l'agriculture sous toutes ses formes**.

Sciences sociales

Nous espérons avoir montré dans cet ouvrage que le numérique en agriculture n'est pas uniquement une question de technologie. À tous les niveaux, les solutions existantes ou envisagées sont en lien avec les acteurs humains, et parfois sont elles-mêmes le moyen de créer du lien entre différents acteurs. **Les recherches en sciences humaines et sociales sont donc une partie intégrante des recherches sur le numérique en agriculture.** Un premier sujet qui n'est pas nouveau mais qui va se révéler de plus en plus prégnant est le lien entre l'humain et des solutions techniques de plus en plus complexes : comment établir une collaboration harmonieuse et épanouissante avec ces solutions pour les acteurs humains ? Comment éviter le risque de "*deskilling*" ? Une piste particulièrement prometteuse semble être de mettre l'accent sur les approches de coconception participatives, en trouvant comment impliquer au plus tôt et au mieux les acteurs de la filière. Ces approches dépassent la conception d'outils : un sujet important est de s'appuyer sur le numérique pour découvrir de nouvelles méthodes de collaborations entre acteurs humains. C'est particulièrement pertinent pour aller vers une meilleure gestion de ressources communes, où les intérêts individuels et collectifs peuvent se retrouver en opposition.

Politiques publiques

Enfin, la «transition numérique» en agriculture amène des changements devant être traités à l'échelle de politiques publiques. Le point qui nous semble le plus important est **la gouvernance de la donnée**. Les nouveaux moyens techniques ont transformé les agriculteurs en producteurs de données, que ce soit *via* des capteurs qu'ils possèdent, ou *via* des saisies manuelles de leur part (approches participatives). Il y a une réflexion urgente à mener sur la valeur de ces données, leur droit d'usage et leur protection. C'est un sujet difficile car d'une part la mise en commun de la grande masse de données produites peut bénéficier à tous, mais d'autre part trop d'ouverture peut nuire à la compétitivité d'un exploitant ou d'un territoire. Actuellement, une part de ces données se retrouve entre les mains d'acteurs privés (exemple : les fournisseurs des technologies et des services) qui bénéficient d'une vision globale sans forcément une grande réciprocité vers

la filière agricole. Pour éviter cet écueil, le conseil national du numérique recommande de conférer aux données agricoles un statut de bien commun⁸⁶.

Un autre sujet important est de travailler à une meilleure **quantification et analyse des flux de matière sur les différentes échelles de territoires**, afin de faciliter la mise en place de modèles économiques alternatifs relevant par exemple de la bioéconomie ou de l'économie biophysique.

Inria-INRAE, une association pertinente pour aborder ces recherches

En lien avec leurs missions propres, l'association de nos deux instituts Inria et INRAE est un atout pour traiter les sujets présentés autour de l'agriculture numérique par la complémentarité des approches et compétences sur lesquelles ils peuvent s'appuyer : INRAE avec une culture des outils expérimentaux et de la collecte de données, des compétences en modélisation des systèmes biologiques avec des panels d'experts et des modèles très riches, et une expertise en sciences économiques et sociales en particulier autour de l'agriculture et de ses acteurs, territoires et filières, enrichie par un contact avec la profession et une connaissance des besoins et des métiers ; Inria par son expertise dans les sciences et technologies du numérique – mathématique et informatique – en particulier en modélisation, simulation, intelligence artificielle, science des données, cybersécurité, réseaux et robotique, et sa culture ancrée à la fois dans la recherche, le développement technologique, le transfert et l'innovation.

Les instituts INRAE et Inria ont une longue histoire de collaborations, d'interactions et de collaborations mutuelles (équipes-projets communes, thèses coencadrées, journées scientifiques conjointes, etc.), qui est montée en puissance récemment *via* des grands projets structurants comme *#DigitAg* (voir encadré) et le PEPR « Agroécologie et numérique » de la stratégie d'accélération SADEA, engagé en 2021 et coporté par les deux instituts. Ces collaborations sont très riches et porteuses de sens pour les chercheurs impliqués. Au vu des défis sans précédent posés par la transition numérique et agroécologique de l'agriculture, cette collaboration ne peut qu'être amenée à se renforcer. Ensemble, et avec leurs partenaires historiques en agronomie (CIRAD, grandes écoles d'agronomie, IRD, CGIAR...) et en mathématiques et informatique (universités, CNRS...), les deux instituts ont très certainement le potentiel pour relever ces défis et ainsi contribuer à répondre aux fortes attentes de la société sur son agriculture.

86. <https://cnnumerique.fr/tribune-agriculture>

 En savoir +

#DigitAg, l'Institut Convergences Agriculture Numérique, porté par INRAE est l'un des dix instituts Convergences français, financé par le Programme Investissements d'Avenir (9,9 M€). Localisé à Montpellier avec des antennes à Toulouse, Rennes et Avignon, il regroupe plus de 550 personnes (en 2020) issues de 8 organismes publics et parapublics et s'appuie sur 8 entreprises de l'AgTech. Débuté en 2017 pour une durée initiale de huit ans, son objectif est de préparer le développement harmonieux du numérique dans l'agriculture, en France et dans les pays du Sud. Pour cela, il développe des recherches pluri et interdisciplinaires : une soixantaine de bourses de thèses cofinancées, une vingtaine de thèses labellisées, 12 postdocs, 150 stages de masters financés. Une *graduate school* a été construite pour inventorier les ressources pédagogiques utiles à ce secteur et de nouvelles formations sont nées (*data science*). Enfin, l'institut sensibilise les étudiants à l'innovation, par des rencontres avec les entreprises, des cours sur la propriété intellectuelle, un service de développement informatique pour construire des démonstrateurs web à partir des résultats de thèse et un observatoire des usages du numérique en agriculture. Il a une activité internationale soutenue, en particulier en direction des pays du Sud. Plusieurs équipes INRAE et Inria y travaillent ensemble.

Contributions et remerciements

Ont contribué à la rédaction de ce livre,

Nom	Institut, unité, site	Membre	Chapitres
Bellon-Maurel, Véronique	INRAE, UMR ITAP, Montpellier	#DigitAg, Digigral	Coéditrice
Bisquert, Pierre	INRAE, UMR IATE, Montpellier	#DigitAg, Digigral	6
Bonnet, Pascal	CIRAD, Dept E&S, Montpellier	#DigitAg	4, 6
Bouadi, Tassadit	Univ. de Rennes 1, Lacadam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3, 6
Brossard, Ludovic	INRAE, UMR PEGASE, Rennes	#DigitAg, Digigral	Coéditeur
Chambaz, Grégoire	Unisanté, Lausanne, Suisse		5
Courtonne, Jean-Yves	Inria, STEEP, Grenoble		4
Dedieu, Benoit	INRAE, UAR ACT, Theix		2
Gandon, Nathalie	INRAE, déléguée Informatique et Libertés		5
Garcia, Frédéric	INRAE, UR MIAT, Toulouse	#DigitAg	Coéditeur
Gautron, Romain	CIRAD, AIDA	#DigitAg	3
Hilgert, Nadine	INRAE, UMR MISTEA, Montpellier	#DigitAg	3
Ienco, Dino	INRAE, UMR TETIS, Montpellier	#DigitAg	3
Javelle, Aurélie	L'Institut Agro-Montpellier SupAgro, UMR Innovation, Montpellier	#DigitAg	5
Labarthe, Pierre	INRAE, UMR AGIR, Toulouse	#DigitAg, Digigral	4, 5, 6
Lagacherie, Philippe	INRAE, UMR LISAH, Montpellier	#DigitAg, Digigral	Séminaire
Largouët, Christine	L'Institut Agro- Rennes, Lacadam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3
Lenain, Roland	INRAE, UR TSCF, Clermont-Ferrand		3, 6
Lutton, Evelyne	INRAE, UMR MIA, Paris	Digigral	3, 6
Martin-Clouaire, Roger	INRAE, UR MIAT, Toulouse	#DigitAg	3
Masson, Véronique	Univ. de Rennes 1, Lacadam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3
Maurel, Pierre	INRAE, UMR TETIS, Montpellier	#DigitAg	4, 6
Mitton, Nathalie	Inria, FUN, Lille		Coéditrice
Molenat, Jérôme	INRAE, UMR LISAH, Montpellier	#DigitAg	Séminaire
Mugnier, Marie-Laure	LIRMM, Inria, Montpellier	#DigitAg	3

Nom	Institut, unité, site	Membre	Chapitres
Neveu, Pascal	INRAE, UMR MISTEA, Montpellier	#DigitAg	3
Piot-Lepetit, Isabelle	INRAE, UMR MOISA, Montpellier	#DigitAg, Digigral	6
Pla Aragones, Lluís Miquel	Université de Lleida, Espagne		6
Prados, Emmanuel	Inria, STEEP, Grenoble		2, 5
Preux, Philippe	Inria, Scool, Lille		3
Raynal, Hélène	UMR AGIR, Toulouse	#DigitAg	3
Reboud, Xavier	INRAE, UMR Agroécologie, Dijon		6
Roussey, Catherine	INRAE, UR TSCF, Clermont-Ferrand		3
Termier, Alexandre	Univ. de Rennes 1, Lacodam, Inria Rennes Bretagne Atlantique	#DigitAg	Coéditeur

Les appuis financiers des programmes: #DigitAg, l'Institut Convergence Agriculture Numérique – aide gérée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-16-CONV-0004) au titre du Programme d'Investissements d'Avenir – et **Digigral**, groupe pluridisciplinaire mandaté par INRAE pour construire une programmation sur la digitalisation des systèmes agri-alimentaires.

Merci à Hervé Monod, INRAE et Jacques Sainte-Marie et Pascal Guitton, Inria, pour leur suivi rapproché et aux directions générales des deux instituts pour leur confiance et leur appui.

Bibliographie

CHAPITRE 1

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C. (2016) *L'innovation technologique en agriculture*. Géoéconomie, 80 – 159-180.

Blezat Consulting, CREDOC, Deloitte Développement Durable (2017). *Étude prospective sur les comportements alimentaires et élaboration d'un dispositif de suivi*, Étude commandée par le centre d'étude et prospective du ministère de l'Agriculture, 123p., disponible à <https://agriculture.gouv.fr/etude-prospective-sur-les-comportements-alimentaires-de-demain>.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

DGE (2019) *Technologies-clés - Préparer l'industrie du futur 2020*, 640 p. Disponible à https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/innovation/technologies-clés-2020/technologies-clés-2020.pdf.

Dinesh, D., Campbell, B., Bonilla-Findji, O., Richards, M. (eds). (2017). *10 best bet innovations for adaptation in agriculture: A supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines*. CCAFS Working Paper no. 215. Wageningen, The Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Disponible à <https://www.agroforesterie.fr/actualites/2017/documents/10-best-bet-innovations-for-adaptation-in-agriculture-A-supplement-to-the-UNFCCC-NAP-Technical-Guidelines-CGIAR-Research-Program-on-Climate-Change-Agriculture-and-Food-Security-CCAFS.pdf>.

FAO (2018a) *The future of food and agriculture: alternative ways to 2050*, FAO, Rome, 202 p.

FAO (2018b), *Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie*, disponible à <http://www.fao.org/3/I9049FR/I9049fr.pdf>.

FAO (2019) *Digital Technologies in Agriculture and Rural Areas – Briefing Paper*. 18 p. Disponible à <http://www.fao.org/3/ca4887en/ca4887en.pdf>.

Isaac, H., Pouyat, M. (2015) *Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique*. Ed. Renaissance Numérique, Paris (Fr), 106 p., disponible à : https://www.renaissancenumerique.org/system/attach_files/files/000/000/010/original/LB_AGRI_HD.pdf?1485335906.

Malassis, L. (1994) *Nourrir les Hommes*, Dominos – Flammarion, Paris, 110 p.

OCDE (2019) *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*. 23 Sep 2019, 234 p. (EPUB). <https://doi.org/10.1787/571a0812-en>.

Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J., (2012). *Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society*. *Sci. Public Policy* 39, pp 751–760.

Scandurra, A., Picchio, C., Ruffino, C., Piertaccini, M., Rocha da Silva, W., Marguglio, A., Antonucci, C., Coraretti, E., Castiello d'Antonio, A. (2020) *Smart agriculture: Digitalizing the entire agriculture chain from the field to production, up to the management of national and international funds*. Ed. *Engineering, Italy*, disponible à <https://h2020-demeter.eu/smart-agriculture-agriculture-4-0-the-digital-transformation-of-the-agricultural-sector/>.

Scholz, R. W., Bartelsman, E.J., Diefenbach, S., Franke, L., Grunwald, A., Helbing, D., Hill, R., Hilty, L., Höjer, M., Klausner, S., Montag, C., Parycek, P., Prote, J.P., Renn, O., Reichel, A., Schuh, G., Steiner, G., Viale Pereira, G. (2018) *Unintended Side Effects of the Digital Transition: European Scientists' Messages from a Proposition-Based Expert Round Table*. *Sustainability*, 10, 2001.

The Hale Group & LSC (2014) *Digital Transformation of Row Crop Agriculture. A Report to the Iowa AgState Group*, 27 p., disponible à <https://www.iasoybeans.com/pdfs/AgStateExecutiveSummary.pdf>

CHAPITRE 2

Bai, J., Seale, J.L., Jr and Wahl, T.I. (2020) *Meat demand in China: to include or not to include meat away from home?* *Aust J Agric Resour Econ*, 64: 150-170.

Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O. (2019) *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*, Springer International Publishing, XVI, 335 p.

Brown, L. R. (2012) *Full Planet, Empty Plates – The New Geopolitics of Food Scarcity*, W. W. Norton & Co, New-york & London.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Charrier, F., Mourad, H., Barbier, M. (2020) *Rendre l'ingérable gérable par la transformation collective de la situation de gestion : étude du cas de la gestion d'une maladie animale en Corse*. *Gérer et Comprendre. Annales des Mines*, 139, 33-45.

CITEPA (2018). *Rapport Secten, Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques, Bilan des émissions en France de 1990 à 2017*. <https://www.citepa.org/fr/secten/>

FAO, FIDA, OMS, PAM, UNICEF. (2017) *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2017. Renforcer la résilience pour favoriser la paix et la sécurité alimentaire* Rome, FAO.

FAO (2019a) *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*, Bélanger, J. & Pilling, D. (eds.). *FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments*. FAO, Rome. 572 p.

FAO (2019b). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2019. Aller plus loin dans la réduction des pertes et gaspillages de denrées alimentaires*. FAO, Rome.

Gasselin, P., Choisis, J.P., Petit, S., Purseigle, F., Zasser, S. (2015). *L'agriculture en famille : travailler, réinventer, transmettre*. EDP Sciences.

Gasselin, P., Lardon, S., Cerdan, C., Loudiyi, S., Sautier, D., Van der Ploeg, J. D. (2021) *Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires : un nouveau paradigme du développement territorial*. Éditions Quae.

Geels, F.W. (2002) *Technological transitions as evolutionary configuration processes: A multi-level perspective and a case-study*. *Res. Policy*, 31, 1257-1274.

Ghai, D. (2003) *Travail décent : concept et indicateurs*. *Revue internationale du Travail*, 42 (2), 121 – 157.

Gibbs, E. P.J (2014) *The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future*. *Veterinary Record*, 174(4), 85-91.

GIEC (2014). *Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Disponible le 20-04-2021 sur <https://repository.uneca.org/handle/10855/23228>.

Hervieu, B., Purseigle, F. (2013). *Sociologie des mondes agricoles*. Paris : Armand Colin.

HLPE (2016). *Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock? A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i5795e.pdf>.

Porcher, J. (2011) *Vivre avec les animaux. Une utopie pour le XXI^{ème} siècle*. Éd La Découverte/Mauss.

Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K. A.G. (2019) *Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers*, *Biological Conservation*, 232, 8-27.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, G. (2017) *A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities: a review*. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 21.

UNESCO (2019). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte*. Disponible le 20-04-2021 sur https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367303_fre.locale=fr.

Zinsstag, J., Schellin, E., Waltner-Toews, D., Whittaker, M., Tanner, M. (2015) *One Health: The Theory and Practice of Integrated Health Approaches*, CAB International, Wallingford, UK.

CHAPITRE 3

Abdullah, A., Hussain, A. (2006) *Data mining a new pilot agriculture extension data warehouse*. *Journal of Research and Practice in Information Technology* 38.3, 229.

Akplogan, M., de Givry, S., Metivier, J.P., Quesnel, G.; Joannon, A., Garcia, F. (2013) *Solving the Crop Allocation Problem using Hard and Soft Constraints*. *RAIRO – Operations Research, EDP Sciences*, 47 (2), 151-172.

Aubin, S., Caracciolo, C., Zervas, P., Aventurier, P., Buche, P., Ferreyra, A., Xian, G., Jonquet, C., Koukourikos, A., Pesce, V., Pierozzi, I.J., Roussey, C., Toulet A., Villa, F., Whitehead, B., Zhang, X., Antezana, E. (2017) *Landscaping the Use of Semantics to Enhance the Interoperability of Agricultural Data*. *RDA Agrisemantics Working Group*.

Bahri, O., Mourhir, A., Papageorgiou, E.I. (2020) *Integrating fuzzy cognitive maps and multi-agent systems for sustainable agriculture*. *Euro-Mediterr J Environ Integr* 5, 7.

Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. N., Talib, M. F. (2016) *Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic*. *Jurnal Teknologi*, 78 (6 13), 137–143.

Benchini, L., Stöckle, C.O. (2007) *Integration of a cropping systems simulation model and a relational database for simple farm-scale analyses*. *Agronomy Journal*, 99 (5), 1226–1237.

Bédard, Y., Rivest, S., Proulx, M.-J. (2007) *Spatial online analytical processing (SOLAP): Concepts, architectures, and solutions from a geomatics engineering perspective*. *Data warehouses and OLAP: concepts, architectures and solutions*. IGI Global, 298–319.

Bellon-Maurel, V., Neveu, P., Termier, A., Garcia, F. (2018) *Le Big Data en agriculture*. *Annales des Mines – Enjeux numériques 2*, 77–81. <http://annales.org/enjeux-numeriques/2018/resumes/juin/16-en-resum-FR-AN-juin-2018.html>.

Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J., van Henten, E. (2016) *Robotics in Agriculture and Forestry*, in *Springer Handbook of Robotics*, Springer International Publishing, 1463–1492.

Bergez, J.E., Eigenraam, M., Garcia, F. (2001) *Comparison between dynamic programming and reinforcement learning: a case study on maize irrigation management*, in: *Proceedings of the 3rd European Conference on Information Technology in Agriculture (EFITA01)*, Montpellier, pp. 343–348.

Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R., Bazán-Vera, W. (2018) *Blockchain in Agriculture: A Systematic Literature Review*. (eds) *Technologies and Innovation*. CITI 2018. *Communications in Computer and Information Science*, 883.

Blender, T., Buchner, T., Fernandez, B., Pichlmaier, B., Schlegel, C. (2016) *Managing a Mobile Agricultural Robot Swarm for a seeding task*, in *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, 6879–6886.

Bommel, P., Bécu, N., Le Page, C., Bousquet, F., Cormas. (2015) *An Agent-Based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics*. *Simulation and Gaming in the Network Society*. Volume 9 of the series *Translational Systems Sciences* pp 387–410. Springer, 2015.

Bouadi, T., Cordier, M.-O., Moreau, P., Quiniou, R., Salmon-Monviola, J., Gascuel-Odoux, C. (2017) *A data warehouse to explore multidimensional simulated data from a spatially distributed agro-hydrological model to improve catchment nitrogen management*. *Environmental Modelling and Software* 97, 229-242.

Boukhelifa, N., Bezerianos, A., Lutton, E. (2018) *Evaluation of Interactive Machine Learning Systems*. In: Zhou, J., Chen, F. (eds) *Human and Machine Learning Visible, Explainable, Trustworthy and Transparent*, Springer, 341-360.

Borodin, V. (2014) *Optimisation et simulation d'une chaîne logistique : application au secteur de l'agriculture*, Thèse de doctorat de l'Université de Troyes.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M. (2015) *Time Series Analysis: Forecasting and Control, 5th Edition*. Published by John Wiley and Sons Inc.

Brun-Laguna, K., Diedrichs, A.L., Dujovne, D., Taffernaberry, C., Leone, R., Vilajosana, X., Watteyne, T. (2018) *Using SmartMesh IP in Smart Agriculture and Smart Building Applications*. *Computer Communications*, 121, 83-90.

Bu, F., Wang, X. (2019) *A smart agriculture IoT system based on deep reinforcement learning*. *Future Generation Computer Systems*, 99, 500-507.

Casagli, F., Zuccaro, G., Bernard, O., Steyer, J.P., Ficara, E. (2021) *ALBA: a comprehensive growth model to optimize algae-bacteria wastewater treatment in raceway ponds*. *IWA Publishing Water Research*. 190.p 116734.

Carpentier, A., Gohin, A., Scokoi, P., Thomas, A. (2015) *Economic modelling of agricultural production: past advances and new challenges*. *Review of Agricultural and Environmental Studies*, 96 (1), 131-165.

Chandra, P., Gupta, M. K. (2018) *Comprehensive survey on data warehousing research*. *International Journal of Information Technology* 10.2, 217-224.

Charvat, K., Charvat Junior, K., Reznik, T., Lukas, V., Jedlicka, K., Palma, R., Berzins, R. (2018) *Advanced Visualisation of Big Data for Agriculture as Part of Databio Development*. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (GARS)*, 2018, 415-418.

Chastant-Maillard, S., Saint-Dizier, M. (2016) *Elevage de précision*. Éditions La France Agricole, Paris. 254 p.

Chatelin, M.H., Aubry, C., Poussin, J.C., Meynard, J.M., Massé, J., Verjux, N., Gat, e Ph., Le Bris, X. (2005) *DéciBlé, a software package for wheat crop management simulation*. *Agricultural. Systems*, 83, 77–99.

Coquet, F., Mémin, J., Slominski, L. (2002) *On non continuous dirichlet processes*. *Journal of Theoretical Probability*, 16, 197–216.

Crespo, O., Bergez, J.-E., Garcia, F. (2010) *Multiobjective optimization subject to uncertainty: Application to irrigation strategy management*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74 (1), 145-154.

Daudé, E. (2004) *Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion*, Cybergeog : *European Journal of Geography*, 2004.

DeAngelis, D.L., Diaz, S.G. (2019) *Decision-making in agent-based Modeling: A current review and future prospectus*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6 (article 237).

Drewniak, B., Song, J., Prell, J., Kotamarthi, V. R., Jacob, R. (2013) *Modeling agriculture in the Community Land Model*, *Geosci. Model Dev.*, 6, 495–515, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-495-2013>.

Ezanno, P., Andraud, M., Beaunée, G., Hoch, T., Krebs, S., Rault, A., Touzeau, S., Vergu, E., Widgren, S. (2020) *How mechanistic modelling supports decision making for the control of enzootic infectious diseases*. *Elsevier Epidemics*, 32, 100398.

Fauvel, K., Masson, V., Fromont, E., Faverdin, P., Termier, A. (2019) *Towards Sustainable Dairy Management – A Machine Learning Enhanced Method for Estrus Detection*. *KDD 2019*, 3051-3059.

Ferreira, A.E., Ortiz, F., Costa, L.H.M.K, Foubert, B., Amadou, I., Mitton, N. (2020) *A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments*. *Annals of Telecommunications – annales des télécommunications*, 75(7-8), 333-351.

Fishwick, P. (2007) *Handbook of dynamic system modeling*. Chapman & Hall/CRC *Computer and Information Science*.

Foubert, B., Mitton, N. (2019) <https://hal.inria.fr/hal-02308015> *ERCIM News, ERCIM, In press, pp.37-38*.

- Foubert, B., Mitton, N. (2021) *Routing Over Multiple Technologies with RODENT*. Percom 2021 (Demo) – 19th International Conference on Pervasive Computing and Communications, Mar 2021, Kassel, Germany.
- Gauthier, R., Largouët, C., Gaillard, C., Cloutier, L., Guay, F., Dourmad, J.Y. (2019) *Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows*. *Journal of Animal Science*, 97(7), 2822–2836.
- Garcia, F. (1999) *Use of reinforcement learning and simulation to optimize wheat crop technical management*, *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'99)* Hamilton, New-Zealand, pp 801-806.
- Georgeff, M., Pell, B., Pollack, M., Tambe, M., Wooldridge, M. (1970) *The Belief-Desire-Intention Model of Agency*. *Lecture Notes in Computer Science*. 10.1007/3-540-49057-4_1.
- Guastella, D. C. (2018) *Ground Vehicle Navigation through Traversability Analysis of Outdoor Environments*. PHD thesis, Università degli Studi di Catania, 143 p. http://dspace.unict.it/bitstream/10761/4143/1/GSTDCL91R14D960H-output_file.pdf.
- Gosavi, A. (2015). *Simulation-Based Optimization. Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*. Springer, 508p.
- Gros de Beler, A. (1998) *Le Nil*. Éditions Molière, Paris.
- Guan, S., Nakamura, N., Shikanai, T. Okazaki, T., (2008) *Hybrid Petri nets modeling for farm work flow*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62 (2), 149-158.
- Gutiérrez, R. (2008) *Papas nativas desafiando al cambio climático: propuesta de adaptación tecnoló*. *Soluciones Practicas*, 2008 - 80 pages.
- Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., Pastell, M. (2019) *Smart Animal Agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production*. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403-425.
- Hélias, A., Guerrin, F., Steyer, J.P. (2008) *Using timed automata and model-checking to simulate material flow in agricultural production systems: Application to animal waste management*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63 (2), 183-192.

Hill, A., Laneurit, J., Lenain, R., Lucet, E. (2020) *Online gain setting method for path tracking using CMA-ES: Application to off-road mobile robot control*. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 7697-7702, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340830.

Huber, R., Bakker, M., Balmann, A., Berger, T., Bithell, M., Brown, C., Grêt-Regamey, A., Xiong, H., Bao Le, Q., Mack, G., Meyfroidt, P., Millington, J., Müller, B., Polhill, G., Sun, Z., Seidl, R., Troos, C., Finger, R. (2018) *Representation of decision-making in European agricultural agent-based models*, *Agricultural Systems*, 167, 143-160.

Hurley, B., O'Sullivan, B., Allouche, D., Katsirelos, G., Schiex, T., Zytnicki, M., de Givry, S. (2016) *Multi-Language Evaluation of Exact Solvers in Graphical Model Discrete Optimization*. *Constraints*, 21(3), 413-434.

Ienco, D., Ose, K., Weber, C. (2019) *Towards combining Satellite Imagery and VGI for Urban LULC classification*. *JURSE*, 1-4.

Jabbar, A., Hansen, K.M.F., Smith, M.L., Smith, L. N. (2017) *Early and non-intrusive lameness detection in dairy cows using 3-dimensional video*. *Biosystems Engineering*, 153, 63-69.

Jones, J.W., Antle, M., Basso, B., Boote, B.K., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, R., Wheeler, T.R. (2016) *Brief history of agricultural systems modeling*. *Agricultural Systems*, 155, 240-254.

Kaghazchi, A., Shahdany, S.M., Roozbahani, A. (2021) *Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model*, *Agricultural Water Management*, 245, 106578.

Kaim, A., Cord, A.F., Volk, M. (2018) *A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation*. *Environmental Modelling & Software*, 105, 79-93.

Kamilaris, A., Prenafeta-Boldú, F. X. (2018) *Deep learning in agriculture: A survey*. *Computer and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

Kamilaris, A., Fonts, A., Prenafeta-Boldú, F. X. (2019) *The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains*, *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640-652.

Karim, F., Majumdar, S., Darabi, H., Harford, S. (2019) *Multivariate LSTM-FCNs for Time Series Classification*, *Neural Networks*, 116, 237-245.

Karlsson, I., Papapetrou, P., Boström, H. (2016) *Generalized Random Shapelet Forests*, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 30(5), 1053–1085.

Knight, C.H. (2020) *Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers*. *Animal*, 14 (S1), s187-s195.

Krid, M., Benamar, F., Lenain, R. (2017) *A new explicit dynamic path tracking controller using generalized predictive control*. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1), 303-314.

Kubicek, P., Kozel, J., Stampach, R., Lukas, V. (2013) *Prototyping the visualization of geographic and sensor data for agriculture*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 83–91.

Kumar, R., Singh, J. (2003) *Regional water management modeling for decision support in irrigated agriculture*. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 129 (6), 432-439.

Lambert, M.J., Sibiry Traoré, P.C., Blaes, X., Baret, P., Defourny, P. (2018) *Estimating smallholder crops production at village level from Sentinel-2 time series in Mali's cotton belt*. *Remote Sensing of Environment*, 216, 647.

Léger, B., Naud, O. (2009) *Experimenting statecharts for multiple experts knowledge elicitation in agriculture*. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11296-11303.

Li, J., Jiao, X., Jiang, H., Song, J., Chen, L. (2020) *Optimization of Irrigation Scheduling for Maize in an Arid Oasis Based on Simulation–Optimization Model*. *Agronomy*, 10 (7), 935. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070935>.

Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X. (2020) *A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems*, *Journal of Cleaner Production*, 268, 121928.

Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T. (2019) *Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture*, *Advances in Water Resources*, 127, 209-224.

Lin, Y.P., Petway, J.R., Johnathen, A., Mukhtar, H., Liao, S.W., Chou, C.F., Ho, Y.F. (2017) *Blockchain: The Evolutionary Next Step for ICT E-Agriculture*, *Environments* 4, no. 3: 50.

S.M., Lee, S.I. (2017) *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*. NIPS, 4765-4774.

Manson, S., Jordan, N., Nelson, K., Brummel, R. (2016) *Modeling the effect of social networks on adoption of multifunctional agriculture*, *Environmental Modelling & Software*, 75, 388-401, ISSN 1364-8152.

Maqrot, S., de Givry, S., Quesnel, G., Tchamitchian, M. (2017) *A Mixed Integer Programming Reformulation of the Mixed Fruit-Vegetable Crop Allocation Problem*. In *30th International Conference on Industrial, Engineering, and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE)*, 12 pages, Arras, France.

Martin, G., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Duru, M. A. (2011) *Simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms*. *Environmental Modelling & Software*, 26, 371-385. 2011.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P. (2004) *Fondements ontologiques des systèmes pilotés*, Tech. report, 2004, Rapport Interne UBIA-INRA, Toulouse-Auzeville (dernière version : juin 2012). <https://hal.inrae.fr/hal-03153904/file/Ontol-Syst-pilot.pdf>.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P. (2009) *Modelling and simulating work practices in agriculture*. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 4(1-2):42-53.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Paré, M., Voltz, M., and Biarnès, A. (2016) *Modelling management practices in viticulture while considering resource limitations: the Dhivine model*. *PLoS ONE* 11(3), 2016.

Martin-Clouaire, R. (2017) *Modelling Operational Decision Making in Agriculture*. *Agricultural Sciences*, 8, 527-544.

McKinion, J.M., Lemmon, H.E. (1985) *Expert Systems for Agriculture*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1, 31-40.

Memmah, M.M., Lescourret, F., Yao, X., Lavigne, C. (2015) *Metaheuristics for agricultural land use optimization*. *A review*. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 975-998.

Mendel, Y.G. (1907) *Recherche sur des hybrides végétaux*. *Le bulletin scientifique de la France et de la Belgique*, tome 41, 371-419.

Millot, A., Mathonat, R., Cazabet, R., Boulicaut, J.F. (2020) *Actionable subgroup discovery and urban farm optimization*. *International Symposium on Intelligent Data Analysis (IDA)*. Apr 2020, Konstanz, Germany.

Minet, J., Curnel, Y., Gobin, A., Goffart, J.P., Mélard, F., Tychon, B., Wellens, J., Defourny, P. (2017) *Crowdsourcing for agricultural applications: A review of uses and opportunities for a farmsourcing approach*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 126-138.

Minsky, H. P. (1965) *Ph.D., The Role of Employment Policy*, Hyman P. Minsky Archive. 270.

Moummadi, M., Abidar, R., Medromi, H. (2011) *Generic model based on constraint programming and multi-agent system for M2M services and agricultural decision support*. *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 1-6.

Nada, A., Nasr, M., Hazman, M. (2014) *Irrigation expert system for trees*. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 3, 170–175.

Ndiaye, S.M. (1999) *Apprentissage par renforcement en horizon fini: application à la génération de règles pour la Conduite de Culture*, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse 3.

O'Leary, D.E. (2008) *A multilingual knowledge management system: A case study of FAO and WAICENT*. *Decision Support Systems*, 45 (3), 641-666.

Padhy, N., Satapathy, S.C. (2020) *Digital Advancement in AgriTech by Using Evolutionary Techniques*. In: Satapathy S., Bhateja V., Mohanty J., Udgata S. (eds) *Smart Intelligent Computing and Applications*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 160. Springer, Singapore.

Palpanas, T. (2000) *Knowledge discovery in data warehouses*. *ACM Sigmod Record* 29.3, 88-100.

Pappu, N., Sarkar, R., Prabhakar, T. V. (2010) *Agropedia: Humanization of Agricultural Knowledge*. *IEEE Internet Computing*, 14 (5), 57-59.

Peart, R.M., Curry R.B. (1978) *Agricultural Systems Modelling and Simulation*. Marcel Dekker, New York. CRC Press. 728 pages. ISBN 9780367400859.

Picault, S., Huang, Y.L., Sicard, V., Arnoux, S., Beaunée, G., Ezanno, P. (2019) *EMULSION: Transparent and flexible multiscale stochastic models in human, animal and plant epidemiology*. *PLOS Computational Biology* 15(9), e1007342.

Pierpaoli, E., Carlia, G., Pignattia, E., Canavaria, M. (2013) *Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review* *Procedia Technology* 8 (2013) 61 – 69 doi: 10.1016/j.protcy.2013.11.010.

Plà-Aragonés, L. M. (Editor) (2015) *Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry*. *International Series in Operations Research & Management Science book series* (ISOR, volume 224), 464 p.

Plaisant, C. (2004) *The challenge of information visualization evaluation*. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, ACM New York, NY, USA, pp. 109–16.

Pommier, C., Michotey, C., Cornut, G., Roumet, P., Duchêne, E., Flores, R., Lebreton, A., Alaux, M., Durand, S., Kimmel, E., Letellier, T., Merceron, G., Laine, M., Guerche, C., Loaec, M., Steinbach, D., Laporte, M.A., Arnaud, E., Quesneville, H., Adam-Blondon, A.F. (2019) *Applying FAIR Principles to Plant Phenotypic Data Management in GnpIS*. *Plant Phenomics 2019*, 1–15.

Reyniers, F. (1996) *Principes d'une modélisation biophysique des exploitations*. In: *Couplage de modèles en agriculture*. Reyniers François (ed.), Benoit-Cattin Michel (ed.). CIRAD-CA. Montpellier: CIRAD, 19-21. (Colloques) ISBN 2-87614-255-4 *Couplages de modèles en agriculture*, Montpellier, France, 14 Juin 1995/15 Juin 1995.

Ribeiro, M.T., Singh, S., Guestrin, C. (2016) *"Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier*. KDD 1135-1144.

Rio, A., Maurel, Y., Bugni, Y., Barais, O. (2019) *Benefits of Energy Management Systems on local energy efficiency, an agricultural case study*. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm 2019)*, Beijing, China, p1-7.

Roussey, C., Chanet, J.P., Souligne, V., Bernard, S. (2011) *Les ontologies en agriculture*. *Instrumentation Mesure Metrologie* 16. 55-84.

Roussey, C., Bernard, S., Pinet, F., Reboud, X., Cellier, I., Sivadon, I., Simonneau, A., Bourigault, A.L. (2017) *A methodology for the publication of agricultural alert bulletins as LOD*. *Computers and Electronics in Agriculture*. 142, 632-650.

- Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L. (2011) *The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79, 42-50.
- Sakoe, H., Chiba, S. (1978) *Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition*. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 26(1), 43-49.
- Salaun, M.C., Bugeon, J., Fatet, A., Hue, I., Hurtaud, C., Nédellec, C., Vernet, J., Reichstadt, M., Le Bail, P.Y. (2018). *Un outil au service de la standardisation des bases de données: les ontologies ATOL/EOL*. Cahier des Cahier des Techniques de l'INRA, INRA, 2018, 93, 1-7.
- Salim, C., Mitton, N. (2020) *K-Predictions Based Data Reduction Approach in WSN for Smart Agriculture*. *Computing*, Springer Verlag, 103 (3), 509-532..
- Schmitt, M., Zhu, X. (2016) *Data Fusion and Remote Sensing: An ever-growing relationship*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4), 6-23.
- Sini, M., Lauser, B., Salokhe, G., Keizer, J., Katz, S. (2008) *The AGROVOC Concept Server: rationale, goals and usage*. *Library Review*, 57 (3), 200-212(13).
- Soullignac, V., Pinet, F., Lambert, E., Guichard, L., Trouche, L., Aubin, S., (2017) *GECO, the French Web-based application for knowledge management in agroecology*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 1050-1056.
- Spanaki, K., Sivarajah, U., Fakhimi, M., Despoudi, S., Irani, Z. (2021) *Disruptive technologies in agricultural operations: a systematic review of AI-driven AgriTech research*. *Ann Oper Res* 308 (2), 1-34.
- Stefas, N., Bayram, H., Isler, V. (2019) *Vision-based monitoring of orchards with UAVs*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104814.
- Street, D. (1990). *Fisher's Contributions to Agricultural Statistics*. *Biometrics*, 46(4), 937-945.
- Taillandier, P., Vo, D.A., Amouroux, E., Drogoul, A. (2010) *GAMA: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control*. *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. 242-258.

Taghikhah, F., Voinov, A., Shukla, N., Filatova, T., Anufriev, M. (2021) *Integrated modeling of extended agro-food supply chains: A systems approach*, *European Journal of Operational Research*, 288 (3), 852-868.

Tonda, A., Boukhelifa, N., Chabin, T., Barnabe, M., Génot, B., Lutton, E., Perrot, N. (2018) *Interactive Machine Learning for Applications in Food Science*. *Human and Machine Learning*, 19.

Tourrette, T., Lenain, R., Rouveure, R., Solatges, T. (2017) *Tracking footprints for agricultural applications: a low cost lidar approach*, *workshop on Agricultural Robotics*, Vancouver.

Trépos, R., Lemarié, S., Raynal, H., Morison, M., Couture, S., Garcia, F. (2014) *Apprentissage par renforcement pour l'optimisation de la conduite de culture du colza*. Presented at JFPDA'14. Journées Francophones Planification, Décision, Apprentissage pour la conduite de système, Liège, BEL (2014-05-12 - 2014-05-13).

Tse, C., Barkema, H., DeVries, T., Rushen, J., Pajor, E. (2018) *Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality*. *Animal*, 12 (12), 2649–2656.

Varenne, F., Silberstein, M. (2013). *Modéliser et simuler. Epistémologie pratique de la modélisation et de la simulation*. Tome 1. Vol. 1. Collection : Sciences & philosophie.

Vespier, U., Knobbe, A.J., Nijssen, S., Vanschoren, J. (2012) *MDL-Based Analysis of Time Series at Multiple Time Scales*. *ECML/PKDD* (2) 371-386.

Wachowiak, M.P., Walters, D.F., Kovac, J.M., Wachowiak-Smoliková, R. (2017) *Visual analytics and remote sensing imagery to support community-based research for precision agriculture in emerging areas*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 149-164.

Wolf, P., Ropertz, T., Feldmann, P., Berns, K. (2019) *Combining Ontologies and Behavior-based Control for Aware Navigation in Challenging Off-road Environments*. In *ICINCO (2) Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Prague, Czech Republic (pp. 135-146).

Xiao, G., Calvanese, D., Kontchakov, R., Lembo, D., Poggi, A., Rosati, R., Zakharyashev, M. (2018) *Ontology-Based Data Access: A Survey*. *IJCAI*, 5511-5519.

Yandun, F. J., Gregorio López, E., Rosell Polo, J. R., Torres-Torriti, M., & Auat Cheein, F. A. (2017) *Terrain classification using ToF sensors for the enhancement of agricultural machinery traversability*. *Journal of Terramechanics*, 76 1-13.

Zabala, J., Martínez-Paz, J., Alcon, F. (2021) *A comprehensive approach for agroecosystem services and disservices valuation*, *Science of The Total Environment*, 768, 144859.

Zhao, J.C., Zhang, J.U., Feng, Y. and Guo, J.X. (2010) *The study and application of the IOT technology in agriculture*, *International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, 462-465.

Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G., Zhang, L., Xu, F., Fraundorfer, F. (2017) *Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5 (4), 8-36.

Zeigler, B. P., Praehofer, H. T., Kim, G. (2000) *Theory of Modeling and Simulation*. 2nd ed. Orlando, FL, USA: Academic Press.

Zelinka, I., Snasael, V. and Abraham, A. (Editor) (2013) *Handbook of Optimization: From Classical to Modern Approach* (Intelligent Systems Reference Library, 38), Springer, 1112 p.

CHAPITRE 4

Adams, M.L., Cook, S.E. (1997) *Methods of on-farm experimentation using precision agriculture technology* – American Society of Agricultural Engineers 1, Proceedings of the 1997 ASAE Annual International Meeting. Part 1, Minneapolis (MN, USA) 10-14 August 1997; Code 48254; 10p.

Altieri, M.A. (1989) *Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture* *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 27 (1-4), 37-46.

Altieri, M.A., Funes-Monzote, F.R., Petersen, P. (2012) *Agroecologically Efficient Agricultural Systems for Smallholder Farmers: Contributions to Food Sovereignty*. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 1-13.

Anderson, C. (2012) *Makers: la nouvelle révolution industrielle*, Paris, Pearson, 309 p.

ANRT (2018) *Pour une politique industrielle du numérique*, Livre blanc. 56 p. disponible sur [politique-industrielle-numerique_futuris-anrt-web.pdf](#)

Antle, J.M., Basso, B., Conant, R.T., Godfray, H.C.J., Jones, J.W., Herrero, M., Howitt, R.E., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Rosenzweig, C., Titttonell, P., Wheeler, T.R. (2017) *Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement*. *Agricultural Systems* 155, 255–268.

Banque Mondiale, 2019, *Future of Food: Harnessing Digital Technologies to Improve Food System Outcomes*. World Bank, Washington, DC, 44 pages. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31565>.

Barreteau, O. (2003) *Our companion modelling approach*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 6 (2), 8 p.

Bécu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., Sangkapitux, C. (2008) *Participatory computer simulation to support collective decision-making: potential and limits of stakeholder involvement*. *Land Use Policy*, 25 (4), 498-509.

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C. (2016) *L'innovation technologique dans l'agriculture*. *Géoéconomie* 80 – mai/juin 2016, 159-180.

Bellon-Maurel, V., Neveu, P., Termier, A., Garcia, F. (2018) *Le Big Data en agriculture*. *Annales des Mines – Enjeux numériques* 2, 77-81.

Bellon-Maurel, V., Short, M.D., Roux, P., Schulz, M., Peters, G.M. (2014) *Streamlining life cycle inventory data generation in agriculture using traceability data and information and communication technologies – Part I: Concepts and technical basis*, *Journal of Cleaner Production*, 69, 60-66.

Bellon-Maurel, V., Peters, G., Clermidy, S., Frizarin, G., Sinfort, C., Ojeda, H., Roux, P., Short, M. (2015) *Streamlining life cycle inventory data generation in agriculture using traceability data and information and communication technologies Part II: Application to viticulture*. *Journal of Cleaner Production*. 87 (1), 119-129.

Benjamin, M., Yik, S. (2019) *Precision livestock farming in swine welfare: a review for swine practitioners*. *Animals*, 9, 133.

Bentley, J.W., Van Mele, P., Barres, N.F., Okry, F., Wanvoeke, J. (2019) *Smallholders download and share videos from the Internet to learn about sustainable agriculture*. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17 (1), 92-107.

Bergez, J.-E., Soullignac, V., Pinet, F., Gobert, J. (2016) *Workshop 4.3: ICT to help on participatory approaches for the agroecological transition of agriculture, in Social and Technological Transformation of Farming Systems: Diverging and Converging Pathways*. Proceedings of the 12th European IFSA Symposium, 12th - 15th July 2016 at Harper Adams University, United Kingdom, Volume 2, Andrew Wilcox and Karen Mills (Eds.).

Bergez, J.-E., Therond, O. (2019) Introduction in Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019) *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*, Springer (Open), https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1, 335 pp., pp 3-12.

Bioteau, T., Béline, F., Laurent, F., Girault, R., Tretyakov, O., Boret, F., Balynska, M. (2013) *Analyse spatialisée pour l'aide à la planification des projets de méthanisation collective*, Sciences Eaux & Territoires 3 (12), 34–41.

Biradar, C.M., Ghosh, S., Löw, F., Singh, R., Chandna, P., Sarker, A., Sahoo, R.N., Swain, N., Choudhury, G., Agrawal, S., Rizvi, N., El-Shamaa, K., Atassi, L., Dong, J., Gaur, A., Wery, J. (2019) *Geo big data and digital augmentation for accelerating agroecological intensification in drylands*. 2019 ISPRS-GEOLAM-ISRS Joint International Workshop on Earth Observations for Agricultural Monitoring; New Delhi (India) 18-20 Feb 2019, 42 (Issue 3/W6) 545-548. Code 150236.

Bonnet, P., Faye, E., Roche, M. (2019). *Éviter une valorisation technologique et économique asymétrique des big data*. Wageningen: SPORE, CTA, 2 pages. <https://spore.cta.int/fr/opinions/article/eviter-une-valorisation-technologique-et-economique-asymetrique-des-big-data-sid0726bd8f1-b891-47fc-8993-87861c5806dd>.

Bonny, S. (2017). *High-tech agriculture or agroecology for tomorrow's agriculture?* Harvard College Review of Environment & Society, 2017, 4 (Spring 2017), pp.28-34.

Brydegaard, M., Gebru, A., Svanberg S. (2014) *Super Resolution Laser Radar with Blinking Atmospheric Particles – Application to Interacting Flying Insects*. Progress In Electromagnetics Research, 147, 141–151.

Calvet-Mir, L., Benyei, P., Aceituno-Mata, L., Pardo-de-Santayana, M., López-García, D., Carrascosa-García, M., Perdomo-Molina, A., Reyes-García, V. (2018) *The contribution of traditional agroecological knowledge as a digital commons to agroecological transitions: The case of the CONNECT-e platform*. Sustainability (Switzerland) 10 (9), 3214.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. Eds. (2020) *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Ed Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Chastant-Maillard, S., Saint-Dizier, M. (2016) *Élevage de précision*. Éditions La France Agricole, Paris, 270 p.

Chowdhary, G., Gazzola, M., Krishnan, G., Soman, C., Lovell, S. (2019) *Soft Robotics as an Enabling Technology for Agroforestry Practice and Research*. *Sustainability*, 11, 6751.

Claquin, P., Martin, A., Deram, C., Bidaud, F., Delgoulet, E., Gassie, J., Hérault, B. (2017) *MOND'Alim 2030, panorama prospectif de la mondialisation des systèmes alimentaires*, Paris, La Documentation française, 228 p.

Cloet, E., Brocard, V., Lessire, F., Guiocheau, S. (2017) *Maximizing grazing with a mobile milking robot*. In *Precision Livestock Farming '17*, 28-34. Disponible sur demande à : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/229020>.

Cook, S., Cock, J., Oberthür T., Fisher, M. (2013) *On farm experimentation*. *Better Crops/Vol. 97* (4), pp.16-20.

Deichmann, U., Goyal, A., Mishra, D. (2016) *Will Digital Technologies Transform Agriculture in Developing Countries ? Policy Research Working Paper;No. 7669*. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24507>.

De Leeuw, J., Vrieling, A., Shee, A., Atzberger, C., Hadgu, M.K., Biradar, M.C., Keah, H., Turvey, C. (2014) *The potential and uptake of remote sensing in insurance: a review*. *Remote Sensors*, 6, 10888-10912.

Della Chiesa, S., la Cecilia, D., Genova, G., Balotti, A., Thalheimer, M., Tappeiner U., Niedrist, G. (2019) *Farmers as data sources: Cooperative framework for mapping soil properties for permanent crops in South Tyrol (Northern Italy)*. *Geoderma*, (342), 93-105.

Dhiab, H., Labarthe, P., Laurent, C. (2020). *How the performance rationales of organisations providing farm advice explain persistent difficulties in addressing societal goals in agriculture*. *Food Policy*, 101914.

Di Salvo, C. (2014) *Critical Making as Materializing the Politics of Design*. *The Information Society*, 30, 96-105.

- Divya, B., Santhi, M. (2019) *SVM-based pest classification in agriculture field*. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7 (5) 150-155.
- Duru, M., Therond, O., Fares, M. (2015) *Designing agroecological transitions: a review*. *Agron Sustain Dev*. 35, 1237–1257.
- El Hassane, A., Kadiri, Z., Kuper, M., Quarouch, H. (2015) *Composer avec l'État : voies d'engagement des jeunes diplômés dans l'agriculture au Maroc*. *Cahiers de l'Agriculture*, 24 (6), 356-36.2.
- Elijah, O., Rahman, T.A., Orikumhi, I., Leow, C.Y., Hindia, M.N. (2018) *An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges*. *IEEE Internet of Things Journal*, 5 (5), 3758-3773.
- Enkel, E., Bogers, M., Chesbrough, H. (2020) *Exploring open innovation in the digital age: A maturity model and future research directions*. *R and D Management*, 50 (1), 161-168.
- Falconnier, G.N., Descheemaeker, K., Mourik, T.A.V., Giller, K.E., (2016) *Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses for better tailoring of options for sustainable intensification in southern Mali*. *Field Crops Res*. 187, 113–126.
- FAO (2020). *Realizing the potential of digitalization to improve the agri-food system: Proposing a new International Digital Council for Food and Agriculture*. A concept note. IT Division. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fielke, S. J., Garrard, R., Jakku, E., Fleming, A., Wiseman, L., & Taylor, B. M. (2019) *Conceptualising the DAIS: Implications of the “Digitalisation of Agricultural Innovation Systems” on technology and policy at multiple levels*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100296.
- Fielke, S., Taylor, B., & Jakku, E. (2020) *Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review*. *Agricultural Systems*, 180, 102763.
- Fountas, S., Carli, G., Sorensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., Tisseyre, B. (2015) *Farm management information systems: Current situation and future perspectives*. *Computers and electronics in agriculture*, 115, 40-50.

Fournel, S., Rousseau, A.N., Laberge B. (2017) *Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming*. *Biosystems Engineering*, 155, 96-123.

Galliano, D., Orozco, L. (2011) *The determinants of electronic traceability adoption: a firm-level analysis of French agribusiness*. *Agribusiness*, Wiley, 27 (3), 379-397.

Gardner, T.A., Benzi, M., Börner, J., Dawkins, E., Fick, S., Garrett, R., Godar, J., Grimard, A., Lake, S., Larsen, R.K., Mardas, N., Dermott, C.L.M., Meyfroidt, P., Osbeck, M., Persson, M., Sembres, T., Suavet, C., Strassburg, B., Wolvekamp, P. (2019) *Transparency and sustainability in global commodity supply chains*. *World Development*, 121, 163-177.

Ghahari, A., Newlands, N.K., Lyubchich, V., Gel, Y.R. (2019) *Deep Learning at the Interface of Agricultural Insurance Risk and Spatio-Temporal Uncertainty in Weather Extremes*. *North American Actuarial Journal*, 23 (4) 535-550.

Gopalakrishnan, P. K., Behdad, S. (2019) *A Conceptual Framework for Using Videogrammetry in Blockchain Platforms for Food Supply Chain Traceability*. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 59223, 12..

Grieve, B.D., Duckett, T., Collison, M., Boyd, L., West, J., Yin, H., Arvin, F., Pearson, S. (2019) *The challenges posed by global broadacre crops in delivering smart agri-robotic solutions: A fundamental rethink is required*. *Global Food Security*, 23, 116-124.

Groot, J.C.J., Jellema, A., Rossing, W.A.H. (2010) *Designing a hedgerow network in a multifunctional agricultural landscape: balancing trade-offs among ecological quality, landscape character and implementation costs*. *European Journal of Agronomy*, 32 (1) 112-119.

Groot, J.C.J., Oomen, G.J.M., Rossing, W.A.H. (2012) *Multi-objective optimization and design of farming systems*. *Agricultural Systems*, 110, 63-77.

Labarthe, P. (2009) *Extension services and multifunctional agriculture. Lessons learnt from the French and Dutch contexts and approaches*. *Journal of environmental management*, 90, S193-S202.

Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., Pastell, M. (2019) *Smart Animal Agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production*, *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403-425.

Ingrand, S. (2018) *Opinion paper: “monitoring te salutant”: combining digital sciences and agro-ecology to design multi-performant livestock farming systems*. *Animal* 12, 2–3.

IPES-Food (2016) *De l’uniformité et la diversité : Changer de paradigme pour passer de l’agriculture industrielle à des systèmes agroécologiques diversifiés*. Rapport, Frison E.A. Eds., 110 p. http://www.ipes-food.org/_img/upload/files/UniformityToDiversity_FULLL.pdf.

Jiménez, D., Pérez-Uribe, A., Satizábal, H., Barreto, M., Van Damme, P., Tomassini, M. (2008) *A survey of artificial neural network-based modeling in agroecology*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 226, 247-269.

Johannes, A., Picon, A., Alvarez-Gila, A., Echazarra, J., Rodriguez-Vaamonde, S., Navajas, A.D., Ortiz-Barredo, A. (2017) *Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 200-209.

Jouanjean, M.A. (2019) *Digital opportunities for trade in the agriculture and food sectors*. *OECD Food, Agriculture and Fisheries* 122.

Kadish, D., Dulic, A. (2015) *Crafting sustainability: approaching wicked environmental problems through high–low tech practice*. *Digital Creativity* 26(1), 65-81.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) *A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda*, *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences* 90-91, nr 100315.

Klerkx, L., Rose, D. (2020) *Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?* *Global Food Security*, 24, nr 100347.

Knight, C.H. (2020) *Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers*. *Animal*, 14 (S1), s187-s195.

Kos, D., Kloppenburg, S. (2019) *Digital technologies, hyper-transparency and smallholder farmer inclusion in global value chains*. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41, 56-63.

Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H. (2018) *Growing camelina as a second crop in France: a participatory design approach to produce actionable knowledge*. *European Journal of Agronomy*, 101, 78–89.

Leibovici, P.E. (2015) *La plate-forme, nouvelle frontière de l'économie*. Les Echos 12 Nov 2015. Acc le 10 Aout 2020 sur <https://www.lesechos.fr/2015/11/la-plate-forme-nouvelle-frontiere-de-leconomie-280276>.

Lemeilleur, S., Allaire, G. (2020) *Système participatif de garantie dans les labels du mouvement de l'agriculture biologiques. Une réappropriation des communs intellectuels*, *Économie Rurale*, 365, Juillet-septembre, 7-26.

Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020) *Prescriptive analytics: Literature review and research challenges*. *International Journal of Information Management*, 50, 57–70.

Leveau, L., Bénel, A., Cahier, J.P., Pinet, F., Salembier, P., Soullignac, V., Bergez, J.E. (2019) *Information and Communication Technology (ICT) and the Agroecological Transition*. In Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019) *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1, 335 pp.

Li, N., Ren, Z., Li, D., Zeng, L. (2020) *Review: Automated techniques for monitoring the behaviour and welfare of broilers and laying hens: Towards the goal of precision livestock farming*. *Animal*, 14 (3), 617-625.

Lixi, M., Dahan, M. (2014) *ICT as an Enabler of Transformation in Ethiopia*. World Bank, Washington, DC. © World Bank <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20076>.

López, O., Martínez, M., Migallon, H., Malumbres, M., Bonastre, A., Serrano, J.J. (2012) *Monitoring Pest Insect Traps by Means of Low-Power Image Sensor Technologies*, *Sensors*, 12(11), 15801-15819.

Lowder, S. K., J. Scoet, et al. (2016) *The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide*. *World Development*, 87, 16-29.

Luvisi, A. (2016) *Electronic identification technology for agriculture, plant, and food. A review*. *Agronomy for sustainable development*, 36 (1), 1-14.

Mattia, C.M., Lovell, S.T., Davis, A. (2018) *Identifying barriers and motivators for adoption of multifunctional perennial cropping systems by landowners in the Upper Sangamon River Watershed, Illinois*. *Agroforestry Systems*. 92(5), 1155-1169.

Messmer, J.G. (2013) *Les circuits courts multiacteurs : émergence d'organisations innovantes dans les filières courtes alimentaires*. Rapport INRA – MaR/S, 669p.

- Meynard, J.-M. (2017) *Agroecology, a new relationship to knowledge and innovation, OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 24 (3), Article number D303.
- Miah, J.H., Griffiths, A., McNeill, R., Halvorson, S., Schenker, U., Espinoza-Orias, N., Morse, S., Yang, A.D. (2018) *A framework for increasing the availability of life cycle inventory data-based on the role of multinational companies. International Journal of Life Cycle Analysis*, 23 (9), 1744-1760.
- Milgroom, J., Bruil J., De Leeuw C. (2016) *Co-creation in the practice, science and movement of agroecology. Farming Matters* 32:6–8, disponible à <https://www.ileia.org/2016/03/23/editorial-co-creation-practice-science-movement-agroecology/>
- Mol, A. P. J., Oosterveer, P. (2015) *Certification of markets, markets of certificates: Tracing sustainability in global agro-food value chains. Sustainability (Switzerland)*, 7(9), 12258–12278.
- Molden, D. (2007) *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in agriculture. International Water Management Institute, Earthscan, London*, 645 pp.
- Moura, D.J., Silva, W.T., Naas, I.A., Tolón, Y.A., Lima, K.A.O., Vale, M.M. (2008) *Real time computer stress monitoring of piglets using vocalization analysis. Computers and Electronics in Agriculture*, 64 (1), 11-18.
- Mul, M.F., Ploegaert, J.P.M., George, D.R., Meerburg, B.G., Dicke, M., Groot Koerkamp, P.W.G. (2016) *Structured design of an automated monitoring tool for pest species. Biosystems Engineering*, 151, 126-140.
- Neethirajan, S. (2017) *Recent advances in wearable sensors for animal health management. Sensing and Bio-Sensing Research*, 12, 15-29.
- OCDE (2011) *Payer pour la biodiversité : améliorer l'efficacité coût des paiements pour services écosystémiques*, Éditions OCDE, <https://www.oecd.org/fr/env/ressources/46900333.pdf>.
- Panten, K., Bramley, R.G.V., Lark, R.M., Bishop, T.F.A. (2010) *Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. Precision Agriculture*, 11 (2) 198-213.
- Pesche, D., Losch, B. Imbernon, J. (dir.) (2016) *Une nouvelle ruralité émergente. Regards croisés sur les transformations rurales africaines. Atlas pour le Programme Rural Futures du NEPAD, deuxième édition revue et augmentée, Montpellier, Cirad, NEPAD*, 76 p.

Pham, X., Stack, M. (2018) *How data analytics is transforming agriculture*. *Business Horizons*, 61(1) 125-133.

Piepho, H.-P., Richter, C., Spilke, J., Hartung, K., Kunick, A., Thöle, H. (2011) *Statistical aspects of on-farm experimentation*. *Crop and Pasture Science*, 62 (9) 721-735.

Pingali, P.L. (2012). *Green revolution: impacts, limits, and the path ahead*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, 109 (31), 12302–12308.

Prada, R., Prendinger, H., Yongyuth, P., Nakasoneb, A., Kawtrakulc, A. (2014) *AgriVillage: A game to foster awareness of the environmental impact of agriculture*, *Computers in Entertainment* 12(2), 1-18.

Rao, K.N. (2010) *Index based crop insurance*. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 1, 193-203.

Reckling, M., Bergkvist, G., Watson, C.A., Stoddard, F.L., Bachinger, J. (2020) *Re-designing organic grain legume cropping systems using systems agronomy*. *European Journal of Agronomy*, 112.

Renting, H., Oostindie, H., Laurent, C., Brunori, G., Barjolle, D., Jervell, A., Granberg, L., Heinonen, M. (2008) *Multifunctionality of agricultural activities, changing rural identities and new institutional arrangements*. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 7(4), 361-385.

Reynolds, D., Baret, F., Welcker, C., Bostrom, A., Ball, J., Cellini, F., Lorence, A., Chawade, A. Khafif, M., Noshita, K., Mueller-Linow, M., Zhou, J., Tardieu, F. (2019) *What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios*. *Plant Science*, Elsevier, 282, 14-22.

Rey-Valette, H., Pinto, M., Maurel, P., Chia, E., Guiheneuf, P.Y., Michel, L., Nougaredes, B., Soulard, C., Jarrige, F., Guillemot, C., Mate, M.S., Ollagnon, H., Delorme, G., Prouheze, N., Laurent, A., Suita, L.A., Bertrand, J., Dieudonne, C., Champorigaud, A., Barbe, E. (2011) *Guide pour la mise en œuvre de la gouvernance en appui au développement durable des territoires*, Montpellier, INRA Éditions. 155pp.

Rieutort, L. (2009) *Dynamique rurales françaises et re-territorialisation de l'agriculture*, *L'information géographique*, 73, 30-48.

- Rotz, S., Duncan, E., Small, M., Botschner, J., Dara, R., Mosby, I., Reed, M., Fraser, E.D.G. (2019) *The Politics of Digital Agricultural Technologies: A Preliminary Review*. *Sociologia Ruralis*, 59 (2), 203-229.
- Rowe, E., Stamp Dawkins, M., Gebhardt-Henrich, S.G. (2019) *A systematic review of precision livestock farming in the poultry sector: is technology focussed on improving bird welfare?* *Animals*, 9, 614.
- Sharma Ghimire, P., Tripathee, L., Chen, P., Kang, S. (2019) *Linking the conventional and emerging detection techniques for ambient bioaerosols: a review*. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 18(3), 495-523.
- Schmidt, P., Möhring, J., Koch, R.J., Piepho, H.-P. (2018) *More, larger, simpler: how comparable are on-farm and on-station trials for cultivar evaluation?* *Crop Sciences*, 58, 1508-1518.
- Schnebelin, E., Labarthe, P., Touzard J.M. (2021). *How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System*. *J. of Rural Studies*, 46, 599-610.
- Schultz, A., Wieland, R., Lutze, G. (2000) *Neural networks in agroecological modelling - Stylish application or helpful tool?* *Computers and Electronics in Agriculture*, 29 (1-2) 73-97.
- Seaborn, K., Fels, D.I. (2015) *Gamification in theory and action: A survey*; *International Journal of Human Computer Studies*, 74, 14-31.
- Shalloo, L., O'Donovan, M., Leso, L., Wener, J., Ruelle, E., Geoghegan, A., Delaby, L., O'Leary, N. (2018) *Review: Grass-based dairy systems, data and precision technologies*. *Animal*, 12 (S2), 262-271.
- Speelman, E.N., García-Barrios, L.E., Groot, J.C.J., Tiftonell, P. (2014) *Gaming for smallholder participation in the design of more sustainable agricultural landscapes*, *Agricultural Systems*, 126, 62-75.
- Tirole, J. (2016) *Économie du bien commun, Chap. 14 Quand le digital modifie la chaîne de valeur*, Paris, PUF.
- Tixier, P., Peyrard, N., Aubertot, J.-N., Gaba, S., Radoszycki, J., Caron-Lormier, G., Vinatier, F., Mollot, G., Sabbadin, R. (2013) *Modelling interaction networks for enhanced ecosystem services in agroecosystems*. *Advances in Ecological Research* 49, 437-480.

Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M., Addom, B.K. (2019) *The Digitalisation of African Agriculture Report*, 2018-2019, CTA, <https://www.cta.int/en/digitalisation/issue/the-digitalisation-of-african-agriculture-report-2018-2019-sid0d88610e2-d24e-4d6a-8257-455b43cf5ed6>.

Tullo, E., Borgonovo, F., Grilli, G., Micheletti, A., Aletti, G., Lolli, S., Guarino, V.F.M. (2018) *Application of an early warning to detect enteropathies in intensive broiler farming*. In: 10th International Livestock Environment Symposium, ILES 2018; Omaha (United States), 25-27 September 2018, p. 2-6. <https://doi.org/10.13031/iles.ILES18-073>.

Van der Burg, S., Bogaardt, M.-J., Wolfert, S. (2019) *Ethics of smart farming: current questions and directions for responsible innovation towards the future*. *Njas - Wageningen J. Life Sci.* 90-91, 100289.

Van Hirtum, A., Berckmans, D. (2004) *Objective recognition of cough sound as a biomarker for aerial pollutants*. *Indoor Air* 14, 10–15.

Vanloqueren, G., Baret, P. (2009) *How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations*. *Research Policy*, 38, 971–983.

Vasconez, J.P., Kantor, G.A., Auat Cheein, F.A. (2019) *Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges*. *Biosystems Engineering* 179, 35-48.

Veissier, I., Kling-Eveillard, F., Mialon, M.-M., Silberberg, M., De Boyer des Roches, A., Terlouw, C., Ledoux, D., Meunier, B., Hostiou, N. (2019) *Élevage de précision et bien-être en élevage : la révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs*. *INRA Productions Animales*, 32 (2), 281-290.

Vrieling, A., Meroni, M., Shee, A., Mude, A.G., Woodard, J., de Bie, C.A.J.M. (2014) *Historical extension of operational NDVI products for livestock insurance in Kenya*. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 28, 238–251.

Vroege, W., Dalhaus, T., Finger, R. (2019) *Index insurances for grasslands – A review for Europe and North-America*. *Agricultural Systems*, 168, 101-111.

Wegener, J.K., Urso, L.M., von Hörsten, D., Minßen, T.F., Gaus, C.G. (2017) *Developing new cropping systems – which innovative techniques are required?* *Landtechnik*, 72(2), 91–100.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J. (2017) *Big Data in smart farming—a review*. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

Wyckhuys, K.A.G., Bentley, J.W., Lie, R., Nghiem, L.T.P., Fredrix, M. (2018) *Maximizing farm-level uptake and diffusion of biological control innovations in today's digital era*. *BioControl*, 63 (1) 133-148.

Xin, H., Liu, K. (2017) *Precision livestock farming in egg production*. *Animals Frontiers*, 27 (1), 24-31.

CHAPITRE 5

Allen, T. F. H., Tainter, J. A., & Hoekstra, T. W. (1999) *Supply-Side Sustainability*. *Systems Research and Behavioral Science*, 16(5), 403–427.

Arthur, WB. (1994) *Increasing returns and path dependence in the economy*. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press (*Economics, Cognition, and Society*), 224 p.

Blandin, M.-C. (2016) *100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie*. Rapport d'information n° 850 (2015-2016), mission d'information du Sénat.

Bos, J., Bovenkerk, B., Feindt, P., Dam, Y. (2018) *The Quantified Animal: Precision Livestock Farming and the Ethical Implications of Objectification*. *Food Ethics*. 2.

Bouissou, J. et Albert, E. (2021) *Bois, cuivre, puces électroniques... La planète touchée par une pénurie de biens*. *Le Monde*, 14 mai 2021.

Boullier, D. (2019) *Sociologie du numérique*. Paris : Armand Colin.

Bournigal, J.-M. (2014) *Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements*. Rapport de la mission Agroéquipements.

Bowler (1986) *Intensification, concentration and specialisation in agriculture: the case of the European Community*. *Geography* 71 (1), 14-24.

Bronson, K., Knezevic, I. (2016) *Big Data in food and agriculture*. *Big Data & Society*, 3(1), 1-5.

Brue, S. L. (1993) *Retrospectives: The Law of Diminishing Returns*. *Journal of Economic Perspectives*, 7(3), 185–192.

Burton, R. J., Riley, M. (2018) *Traditional Ecological Knowledge from the internet? The case of hay meadows in Europe*. *Land Use Policy*, 70, 334-346.

Busse, M., Schwerdtner, W., Siebert, R., Doernberg, A., Kuntosch, A., König, B., Bokelmann, W. (2015) *Analysis of animal monitoring technologies in Germany from an innovation system perspective*. *Agricultural Systems*, 138, 55-65.

Carbonell, I. (2016) *The ethics of big data in big agriculture*. *Internet Policy Review*, 5(1), 1-13.

Carolan, M. (2020) *Acting like an algorithm: digital farming platforms and the trajectories they (need not) lock-in*. *Agriculture and Human Values*, 37 (4), 1041-1053.

Chambaz, G. (2019) *The Evolutionary Dynamics of Societies: Critical Synthesis of the Work of J.A. Tainter et al. On Sustainability, Collapse, Resilience and Energy Transitions*, Master's thesis. Université de Lausanne.

Clap, J., Ruder, S.-L. (2020) *Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability* *Global Environmental Politics*, 20 (3), 49-69.

David, P. (1985) *Clio and the Economics of QWERTY*. *The American Economic Review*, Vol. 75, No. 2, *Papers and Proceedings of the Ninety-Seventh Annual Meeting of the American Economic Association*, 332-337.

Deléage, E. (2013) *Agricultures à l'épreuve de la modernisation*. Paris, Éditions Quæ, « Synthèses », 95 p.

Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. et Prados, E. (2021). *Peak oil and the low-carbon energy transition: a net energy perspective*. *Applied Energy*, Elsevier, 304, 1-17..

Dhar, P. (2021) *Cybersecurity Report: "Smart Farms" Are Hackable Farms*, in *IEEE Spectrum – Risk Factor*, March 15. <https://spectrum.ieee.org/riskfactor/telecom/security/cybersecurity-report-how-smart-farming-can-be-hacked>.

Elhefnawy, N. (2004) *Societal Complexity and Diminishing Returns in Security*. *International Security*, 29(1), 152-174.

Elhefnawy, N. (2008) *A Long-Term Trend Toward the Depletion of Fiscal-Macroeconomic Slack in the World Economy?* (SSRN Scholarly Paper ID 3182381). *Social Science Research Network*.

Ellul, J. (1977) *Le Système technicien*. Paris, Calmann-Lévy.

Fielke, S., Taylor, B., Jakku, E. (2020) *Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review*. *Agricultural Systems*, 180, 102763.

Gupta, M., Abdelsalam, M., Khorsandroo, S., Mittal, S. (2020) *Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Opportunities*, *IEEE Access*, 8, 34564-34584.

Isaac, H., Pouyat, M. (2015) *Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique. 16 propositions pour repenser la production, la distribution et la consommation alimentaires à l'ère du numérique*. Livre Blanc Renaissance Numérique.

Javelle, A., Kazic, D., Tassin, J. (2021) *Introduction au dossier Repenser Le Statut Des Plantes, La pensée écologique*, Presses Universitaires de France.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) *A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90.

Labarthe, P. (2010) *Services immatériels et verrouillage technologique. Le cas du conseil technique aux agriculteurs*. *Économies et sociétés*, 44(2), 173-96.

Lagneaux, S., Servais, O. (2014) *De la traite robotisée au raid d'avatars. Incorporation et virtualisation*. *Parcours anthropologiques*, 9, 73-101.

Larrère, C., Larrère, R. (1997) « *Le contrat domestique* », *Le courrier de l'environnement*, n° 30 <http://www7.inra.fr/dpenv/larrec30.htm>.

Longuet, G. (2019) *Le devoir de souveraineté numérique*, Rapport fait au nom de la commission d'enquête du Sénat, n° 7 tome I (2019-2020).

Marquet, K., Combaz, J., Berthoud, F. (2019) *Introduction aux impacts environnementaux du numérique*. 1024, bulletin de la Société Informatique de France, 85-97.

Meuret, M., Tichit, M., Hostiou, N. (2013) *Élevage et pâturage « de précision » : l'animal sous surveillance électronique*. *Courrier de l'environnement de l'INRA* (63):13-24.

Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.B., Charlier, A., Messéan, A. (2018) *Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France*. *Agronomy for Sustainable Development*. 38, 54.

Miles, C. (2019) *The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality*. *Big Data & Society*, 6(1).

Mundler, P., Labarthe, P., Laurent, C. (2006) *Les disparités d'accès au conseil. Le cas de la région Rhône-Alpes*. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, (291), 26-41.

Pitron, G. (2018) *La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique*. *Les Liens qui Libèrent*, 296 p.

Rotz, S., Gravelly, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., Fraser, E. (2019) *Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labour and rural communities*. *Journal of Rural Studies*, 68, 112-122.

Schneider, I. (2020) *Democratic Governance of Digital Platforms and Artificial Intelligence? Exploring Governance Models of China, the US, the EU and Mexico*. *JeDEM* 12(1), 1-24.

Servigne, P. (2014) *Nourrir l'Europe en temps de crise : Vers des systèmes alimentaires résilients*. *Nature et progrès*.

Stiegler, B. (2015) *La Société automatique : 1. L'avenir du travail*, Fayard, 300 p.

Tainter, J. A. (1990) *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press.

Tainter, J. A. (2009) *Complexity, collapse, and sustainable problem-solving*. In K. W. Hippel (Ed.), *Conflict Resolution* Vol. 2, pp. 349-390. Eolss Publishers.

Tainter, J. A., Patzek, T. W. (2012) *Drilling down: The Golfoil debacle and our energy dilemma*. Copernicus Books and Springer Science+Business Media.

Tainter, J. A. (2016) *Agriculture and the energy-complexity spiral*. *Behavioral and Brain Sciences*, 39, 37-38.

Wolf, S. A., Buttel, F. H. (1996) *The political economy of precision farming*. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1269-1274.

CHAPITRE 6

Académie des technologies (2021) *Innovation dans les industries alimentaires : impacts de la révolution numérique*. Rapport de l'académie des technologies, Paris, 110p.

Ahumada, O., Villalobos, J.R. (2009) *Application of planning models in the agri-food supply chain: a review*. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20.

Ahumada, O., Villalobos, J.R., Nicholas Mason, A. (2012) *Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty*. *Agricultural Systems*, 112, 17-26.

Anderies, J.M., Mathias, J.D., Janssen M.A. (2019) *Knowledge infrastructure and safe operating spaces in social–ecological systems*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (12), 5277–5284.

ANRT (2018) *Pour une politique industrielle du numérique*, Livre blanc. 56 p. disponible sur politique-industrielle-numerique_futuris-anrt-web.pdf.

Arora, A., Athreye, S., Huang, C. (2016) *The paradox of openness revisited: collaborative innovation and patenting by UK innovators*. *Research Policy*, 45, 1352-1361.

Aubin, J.P. (1991) *Viability Theory*. Birhäuser, Boston.

Balaji Prabhu, B.V., Dakshayini, M. (2020) *An effective multiple linear regression-based forecasting model for demand-based constructive farming*. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies*, 15 (2), 1-18.

Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019) *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*, Springer, 335 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1.

Berti, G., Mulligan, C. (2016) *Competitiveness of Small Farms and Innovative Food Supply Chains: The Role of Food Hubs. Creating Sustainable Regional and Local Food Systems*. *Sustainability*, 8 (7), 616, <https://doi.org/10.3390/su8070616>.

Besnard, P., Hunter, A. (2008) *Elements of argumentation*. Cambridge: MIT press, 47.

Biggs, R., Schlüter, M., Schoon, M.L. (2015) *Principles for Building Resilience: Sustaining Ecosystem Services in Social–Ecological Systems*. Cambridge University Press, 390.

Boukhelifa, N., Duke, D.J. (2009) *Uncertainty visualization: why might it fail?* CHI EA '09: CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems April 2009 pp. 4051–4056.

Brandt, F., Conitzer, V., Endriss, U., Lang, J., Procaccia, A.D. (Eds.) (2016) *Handbook of computational social choice*. Cambridge University Press.

Brias, A. (2016) *Conjurer la malédiction de la dimension dans le calcul du noyau de viabilité à l'aide de parallélisation sur carte graphique et de la théorie de la fiabilité : application à des dynamiques environnementales*. Thèse Irstea-LISC, soutenue en décembre 2016 à l'Université Clermont Auvergne.

Bronson, K. (2019). *Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming*. *NJAS – Wageningen Journal of Life Science*, 90–91, 100294.

Bronson, K., Knezevic, I. (2016) *Big Data in food and agriculture*. *Big Data & Society*, 3 (1), 1-5.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Carolan, M. (2017). *Publicising food: big data, precision agriculture, and coexperimental techniques of addition*. *Sociologia Ruralis*, 57(2), 135-154.

Carolan, M. (2018) *'Smart' farming techniques as political ontology: Access, sovereignty and the performance of neoliberal and not so neoliberal worlds*. *Sociologia ruralis*, 58(4), 745-764.

Charvat, K., Charvat Junior, K., Řezník, T., Lukas, V., Jedlička, K., Palma, R., Berzins, R. (2018) *Advanced Visualisation of Big Data for Agriculture as Part of Databio Development*, IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, 2018, pp. 415-418. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517556.

Courtonne, J.Y., Alapetite, J., Longaretti, P.Y., Dupré, D., Prados, E. (2015) *Downscaling material flow analysis: The case of the cereal supply chain in France*. *Ecological Economics*, 118, 67-80.

Crespo, O., Bergez, J., Garcia, F. (2010) *Multiobjective optimization subject to uncertainty: application to irrigation strategy management*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 145–154.

- De Leeuw, J., Vrieling, A., Shee, A., Atzberger, C., Hadgu, M.K., Biradar, M.C., Keah, H., Turvey, C. (2014) *The potential and uptake of remote sensing in insurance: a review*. *Remote Sensors*, 6, 10888-10912.
- Dominiak, K.N., Kristensen, A.R. (2017) *Prioritizing alarms from sensor-based detection models in livestock production - A review on model performance and alarm reducing methods*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 133, 46-67.
- Dumont, B., Groot, J.C.J., Tichit, M. (2018) *Review: Make ruminants green again – how can sustainable intensification and agroecology converge for a better future?* *Animal*, 12(s2), S210-S219.
- Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., Dela Rue, B. (2019) *Managing socioethical challenges in the development of smart farming: from a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation*. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32 (5-6), 741-768.
- Ellis, J.L., Jacobs, M., Dijkstra, J., van Laar, H., Cant, J.P., Tulpan, D., Ferguson, N. (2020) *Review: Synergy between mechanistic modelling and data-driven models for modern animal production systems in the era of big data*. *Animal*, 14 (S2), s223-s237.
- Enkel, E., Bogers, M., Chesbrough, H. (2020) *Exploring open innovation in the digital age: A maturity model and future research directions*. *R and D Management*, 50 (1), 161-168.
- Fekete, J.D., Fisher, D., Nandi, A., Sedlmair, M. (2019) *Progressive Data Analysis and Visualization (Dagstuhl Seminar 18411)*. *Dagstuhl Reports*. <https://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2019/10346/>
- Fielke, S.J., Garrard, R., Jakku, E., Fleming, A., Wiseman, L., Taylor, B.M. (2019). *Conceptualising the DAIS: Implications of the 'Digitalisation of Agricultural Innovation Systems' on technology and policy at multiple levels*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100296.
- Gardner, T.A., Benzi, M., Börner, J., Dawkins, E., Fick, S., Garrett, R., Godar, J., Grimard, A., Lake, S., Larsen, R.K., Mardas, N., Dermott, C.L.M., Meyfroidt, P., Osbeck, M., Persson, M., Sembres, T., Suavet, C., Strassburg, B., Wolvekamp, P. (2019) *Transparency and sustainability in global commodity supply chains*. *World Development*, 121, 163-177.

Ghahari, A., Newlands, N.K., Lyubchich, V., Gel, Y.R. (2019) *Deep Learning at the Interface of Agricultural Insurance Risk and Spatio-Temporal Uncertainty in Weather Extremes*. *North American Actuarial Journal*, 23 (4), 535-550.

Groot, J.C.J., Oomen, G.J.M., Rossing, W.A.H. (2012) *Multi-objective optimization and design of farming systems*. *Agricultural Systems*, 110, 63-77.

Hansen, B. G., Stræte, E. P. (2020) *Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 92, 100328.

Hill, A., Lucet, E., Lenain, R., Laneurit, J. (2019) *Neuroevolution with CMA-ES for real-time gain tuning of a car-like robot controller*. *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019)*, pp. 311-319.

Husnjak, S., Perakovića, D., van Forenbacher, I., Mumdziev M. (2015) *Telematics System in Usage Based Motor Insurance*, *Procedia Engineering*, 100, 816-825.

Ingrand, S. (2018) *Opinion paper: 'monitoring te salutant:' combining digital sciences and agro-ecology to design multi-performant livestock farming systems*. *Animal*, 12, 2-3.

Inria (2019) *Cybersecurity: Current challenges and Inria's research directions*, 168 p, Inria, Le Chesnay, France.

Jakku, E., Taylor, B., Fleming, A., Mason, C., Fielke, S., Sounness, C., Thorburn, P. (2019) *"If they don't tell us what they do with it, why would we trust them?" Trust, transparency and benefit-sharing in Smart Farming*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100285.

Klerkx L., Rose D. (2020) *Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?* *Global Food Security*, 24, 100347.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) *A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda*, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91, 100315.

Kilgour, D. M., Eden, C. (Eds.) (2010) *Handbook of group decision and negotiation*. *Springer Science & Business Media*, 4.

Laneurrit, J., Chapuis, R., Debain, C. (2016) *TRACKBOD, an accurate, robust and low cost system for mobile robot person following*. MCG 2016 – 5th International Conference on Machine Control & Guidance “Facing complex outdoor challenges by inter-disciplinary research” Vichy, France, October 5-6th, 2016, 6 p. Accessible sur https://mcg2016.irstea.fr/wp-content/uploads/2017/05/MCG2016_paper_31.pdf.

Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020) *Prescriptive analytics: Literature review and research challenges*. *International Journal of Information Management*, 50, 57–70.

Li, J., Rodriguez, D., Zhang, D., Ma, K. (2015) *Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 12-18.

Melkonyan, A., Gruchmann, T., Lohmar, F., Kamath, V., Spinler, S. (2020) *Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks*. *International Journal of Production Economics*, 228, 107746.

Morin, E. (2014) *Introduction à la pensée complexe*, Éditions du Seuil, « Points essais » n°534.

Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J. (2012) *Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society*. *Science and Public Policy*, 39(6), 751–760.

Pellé, S., Reber, B. (2015) *Responsible innovation in the light of moral responsibility*. *Journal on Chain and Network Science*, 15(2), 107-117.

Potter K., Rosen P., Johnson C.R. (2012) *From Quantification to Visualization: A Taxonomy of Uncertainty Visualization Approaches*. In: Dienstfrey A.M., Boisvert R.F. (eds) *Uncertainty Quantification in Scientific Computing*. WoCoUQ 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 377. Springer, Berlin, Heidelberg, pp.226-249.

Rey-Valette, H., Pinto, M., Maurel, P., Chia, E., Guiheneuf, P.Y., Michel, L., Nougaredes, B., Soulard, C., Jarrige, F., Guillemot, S.C., Mate, M.S., Ollagnon, H., Delorme, G., Prouheze, N., Laurent, A., Suita, L.A., Bertrand, J., Dieudonné, C., Champorigaud, A., Barbe, E. (2011) *Guide pour la mise en œuvre de la gouvernance en appui au développement durable des territoires*. Montpellier, INRA Editions. 155 p.

Rose, D.C., Chilvers, J. (2018) *Agriculture 4.0: broadening responsible innovation in an Era of smart farming*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87.

Ryschawy, J., Moraine, M., Péquignot, M., Martin, G. (2019) *Trade-offs among individual and collective performances related to crop–livestock integration among farms: a case study in southwestern France*. *Organic Agriculture*, 9(4), 399-416.

Stilgoe, J., Owen, R., Macnaghten, P. (2013) *Developing a framework for responsible innovation*. *Research Policy*, 42, 1568– 1580.

Sutherland, L. A., Mills, J., Ingram, J., Burton, R. J., Dwyer, J., Blackstock, K. (2013) *Considering the source: Commercialisation and trust in agri-environmental information and advisory services in England*. *Journal of environmental management*, 118, 96-105.

Svetlin, I., Makatsoris, H., Jreissat, M., Wagner, C. (2016) *Linking human and machine - towards consumer-driven automated manufacturing*. *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Vancouver, CN*, pp 1789-1796.

Tesfaye, A., Hansen, J., Kassie, G.T., Radeny, M., Solomon, D. (2019) *Estimating the economic value of climate services for strengthening resilience of smallholder farmers to climate risks in Ethiopia: A choice experiment approach*. *Ecological Economics*, 162, 157-168.

Tisseyre, B., McBratney, A.B. (2008) *A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: An application to viticulture*. *Precision Agriculture*, 9 (1-2), 101-113.

Trnka, M., Eitzinger, J., Kapler, P., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., Formayer, H. (2007) *Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models*. *Sensors*, 7 (10), 2330-2362.

Trompette, P., Vinck, D. (2009) *Retour sur la notion d'objet-frontière*. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(1), 5-27.

Vik, J., Stræte, E. P., Hansen, B. G., Nærland, T. (2019) *The political robot–The structural consequences of automated milking systems (AMS) in Norway*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100305.

Vinck, D. (1999) *Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales*. *Revue Française de Sociologie*, XI, 385-414.

Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A., Jakku, E. (2019) *Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100301.

Wolf, S.A., Buttel, F.H. (1996) *The political economy of precision farming*. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1269-1274.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J. (2017) *Big Data in Smart Farming – A review*. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

Wu, X., Aravecchia, S., Pradalier, C. (2019) *Design and implementation of computer vision based in-row weeding system*. 2019 *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, p. 4218–4224.

Liste des acronymes

- **ANRT** : Association nationale de la recherche et de la technologie
- **AOC** : Appellation d'origine contrôlée
- **AOP** : Appellation d'origine protégée
- **CATI** : Centre automatisé de traitement de l'information
- **CITEPA** : Centre technique de référence en matière de pollution atmosphérique et de changement climatique
- **DEEE** : Déchet d'équipement électrique et électronique
- **DGE** : Direction générale des entreprises
- **DSS** : *Decision Aid System* (traduction anglaise de « outil d'aide à la décision »)
- **ERP** : Enterprise Resource Planning, parfois appelé PGI (Progiciel de gestion intégré)
- **ETSI** : *European Telecommunications Standards Institute*
- **FAO** : *Food and Agriculture Organization* – Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
- **FNSEA** : Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles
- **GES** : Gaz à effet de serre
- **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- **GIS** : *Geographical Information Systems*
- **GPS** : *Global Positioning System*
- **HLPE** : *High Level Panel of Experts* de l'ONU
- **IHM** : Interaction homme-machine
- **INRAE** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
- **Inria** : Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique.
- **IoT** : *Internet of Things* – Internet des objets
- **ITU** : *IT University of Copenhagen*
- **JA** : Jeunes agriculteurs
- **MIT** : *Massachusetts Institute of Technology*
- **OAD** : Outil d'aide à la décision (en anglais *Decision Support System*)
- **OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques
- **OIE** : Organisation mondiale de la santé animale (préalablement Office international des épizooties)
- **OLAP** : *On Line Analytical Processing*
- **ONF** : Office national des forêts
- **ONG** : Organisation non gouvernementale
- **ONU** : Organisation des Nations Unies
- **OWL** : *Web ontology language*
- **PAC** : Politique agricole commune
- **PEPR** : Programmes et équipements prioritaires de recherche
- **PSE** : Paiement des services écosystémiques
- **RDA** : *Research Data Alliance*
- **RFID** : Radio frequency identification
- **RGPD** : Règlement général sur la protection des données
- **RRI** : *Responsible research and innovation* (recherche innovation responsable)
- **SADEA** : Systèmes agricoles durables et équipements agricoles contribuant à la transition écologique
- **SAREF** : *Ontologie Smart Applications REference*
- **SGBD** : Système de gestion de base de données
- **SHS** : Sciences humaines et sociales
- **SPG** : Systèmes participatifs de garantie
- **TAE** : Transition agroécologique
- **TIC** : Technologies de l'information et de la communication
- **UE** : Unité expérimentale
- **UMR** : Unité mixte de recherche
- **UMT** : Unité mixte technologique
- **UNESCO** : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*)
- **W3C** : *World Wide Web Consortium*

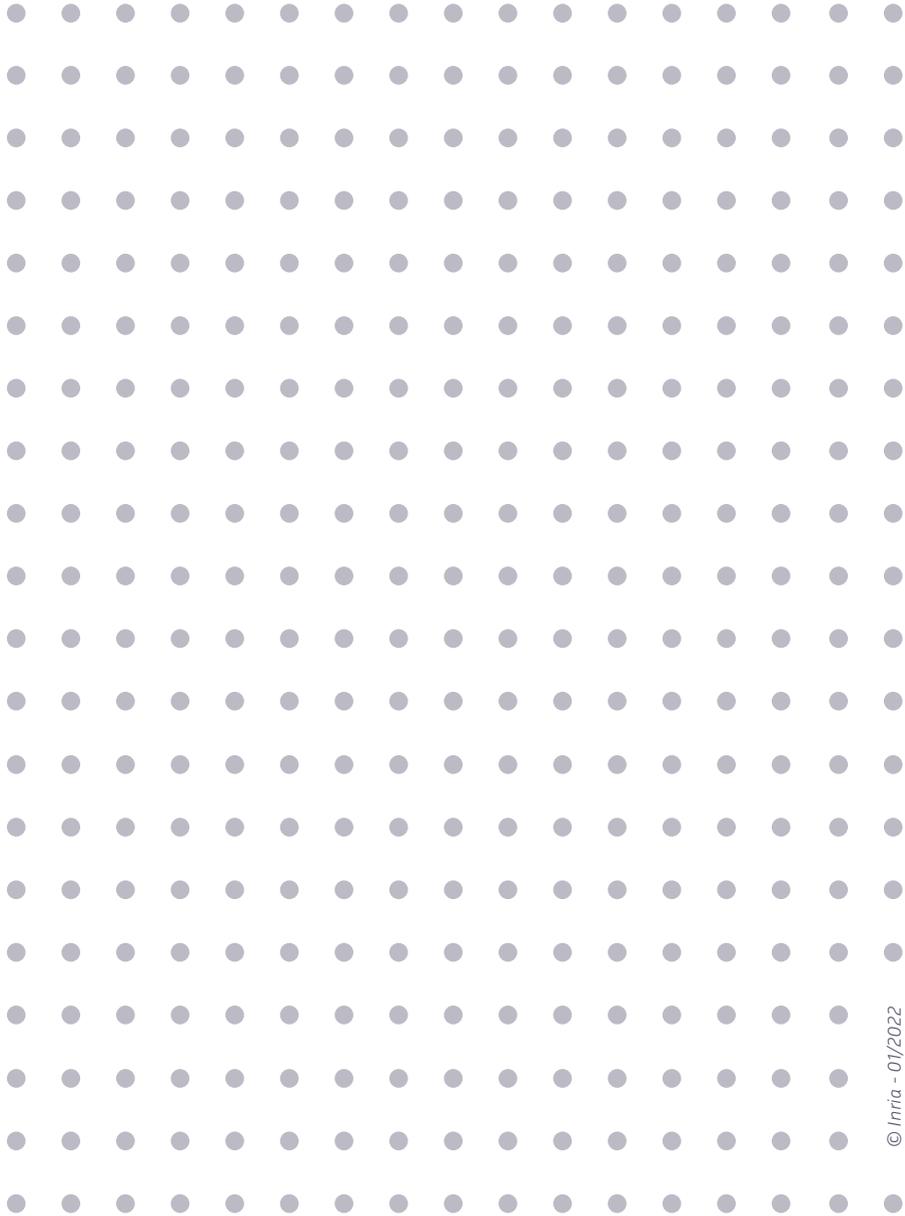
Équipes-projets Inria

<https://www.inria.fr/fr/liste-des-equipes-projets>

Unités de recherche INRAE

<http://annuaire.inrae.fr/accueil.action#ongletStructure>

- **UMR AGROECOLOGIE** : <https://www6.dijon.inrae.fr/umragroecologie>
- **UMR BAGAP** : <https://www6.rennes.inrae.fr/bagap>
- **UMR BIOEPAR** : <https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar/>
- **UMR BOA** : <https://web.univ-tours.fr/umr-0083-biologie-des-oiseaux-et-aviculture-boa>
- **UMR CBGP** : <https://www6.montpellier.inrae.fr/cbcp/>
- **UMR GENPHYSE** : <https://genphyse.toulouse.inra.fr>
- **UMR MISTEA** : <https://www6.montpellier.inrae.fr/mistea>
- **UMR MOSAR** : <https://www6.jouy.inrae.fr/mosar>
- **UMR PEGASE** : <https://www6.rennes.inrae.fr/pegase/>
- **UMR SAS** : <https://www6.rennes.inrae.fr/umrsas/>
- **UMR SELMET** : <https://umr-selmet.cirad.fr>
- **UMR SMART LERECO** : <https://www6.inrae.fr/umt-strategie/Partenaires/INRAE/UMR-1302-SMART-LERECO>
- **UMR Tetis** : <https://umr-tetis.fr/index.php/fr/>
- **UMR TOXALIM** : <https://www6.toulouse.inrae.fr/toxalim>
- **UMR UMRH** : <https://umrh-bioinfo.clermont.inrae.fr/Intranet/web/UMRH>



© Inria - 01/2022

Inria

Domaine de Voluceau, Rocquencourt BP 105
78153 Le Chesnay Cedex, France
Tel.: +33 (0)1 39 63 55 11
www.inria.fr